



รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อใช้งาน
ด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร

Industrial-scale processing of antimicrobial biofilm for food
packaging applications

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

โครงการวิจัยประเภทงบประมาณเงินรายได้จากเงินทุนอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒

มหาวิทยาลัยบูรพา

สัญญาเลขที่ ๕๑.๒/๒๕๖๒

รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์

การขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ในระดับอุตสาหกรรมเพื่อใช้งาน
ด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร

Industrial-scale processing of antimicrobial biofilm for food
packaging applications

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

มีนาคม ๒๕๖๓

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน)
ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒ มหาวิทยาลัยบูรพา ผ่านสำนักงานคณะกรรมการการวิจัยแห่งชาติ

เลขที่สัญญา ๕๑.๒/๒๕๖๒

ผู้วิจัยขอขอบคุณ บริษัท มัลติแบคซ์ จำกัด (มหาชน) ที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ สถานที่ และบุคลากร ในการ
ทำวิจัย ขอขอบคุณ ดร. พิสุทธิ เลิศวิไล คุณอัญชสา กำจายกิตติกุล คุณอังคณา กระจลินทร์ และบุคลากรทุกท่าน
เป็นอย่างสูง ที่ช่วยเหลือคณะวิจัยด้วยดีเสมอมา

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้รายงานการศึกษาการผลิตฟิล์มชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในระดับอุตสาหกรรม ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม เพื่อใช้ประโยชน์ในรูปของบรรจุภัณฑ์ โดยในการผลิตแบ่งเป็นสองขั้นตอน คือ 1) การผลิตเม็ดไบโอพลาสติกคอมพาวด์โดยใช้เครื่องผสมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) และ 2) การเป่าฟิล์มจากเม็ดไบโอพลาสติกคอมพาวด์หลอมด้วยกระบวนการอัดรีดแบบเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion) ผลจากการศึกษาพบว่า การผลิตเม็ดพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสามารถทำได้โดยใช้พลาสติกที่ย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพชนิดอื่น ได้แก่ พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรฟทาเลต (Polybutylene adipate terephthalate, PBAT (Ecoflex®)) หรือ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Low-density polyethylene, LLDPE) เป็นวัสดุหลัก และมีองค์ประกอบของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่เกินร้อยละ 30 อุณหภูมิที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพมีค่าไม่เกิน 170 °C และอุณหภูมิที่ใช้ในการเป่าฟิล์มไม่เกิน 180 °C ฟิล์มพลาสติกชีวภาพที่ได้มีความหนาอยู่ระหว่าง 0.020–0.280 มม. ขึ้นกับองค์ประกอบ และการเกิดเจลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในระหว่างการคอมพาวด์ เม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับ Ecoflex® และ LLDPE ซึ่งมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก มีค่า Blow up ratio อยู่ในช่วง 2.2–3.4 ซึ่งเป็นค่าปกติของการเป่าฟิล์มในอุตสาหกรรมการผลิตถุงพลาสติก โดยค่าความหนาของฟิล์มจะแปรผกผันกับค่า Blow-up ratio สำหรับเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ มีค่า Blow-up ratio ใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วง 3.0–3.2 นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มทุกสูตรยังมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 20–27 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ ฟิล์มทุกสูตรที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน มีความสามารถในการส่องผ่านแสงได้ค่อนข้างดี มีเนื้อสัมผัสเนียน ลื่น เกิดเจลน้อย มีความหนาพอเหมาะในการใช้งานด้านฟิล์ม

ผลการตรวจสอบสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกลของฟิล์ม พบว่า สำหรับฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับ Ecoflex® และ LLDPE ซึ่งมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณมาก ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ต่างกันมีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันอย่างมาก ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักเป็น LLDPE แสดงค่ามอดูลัสของยังสูงกว่าฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักเป็น Ecoflex® (20 MPa และ 7.9 MPa) แต่ให้ค่าระยะยืดต่ำกว่า (29% และ 63%) ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณมาก มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณน้อย ฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำน้อยกว่า มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำมากกว่า สำหรับฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบใน

ปริมาณต่ำ แสดงค่าความทนต่อแรงกระแทก โมดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์ม ลดลง เมื่อฟิล์มมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

งานวิจัยนี้ได้ผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหิ้วจากฟิล์มที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน มีความหนา ผิวสัมผัส และสีที่ต่างกัน แต่สามารถนำมาใช้งานจริงได้ จากการสำรวจความพึงพอใจของผู้บริโภค พบว่าผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหิ้วที่ได้รับการประเมินว่าผู้ประเมินมีความพึงพอใจมากที่สุดคือ ถุงหิ้วจากฟิล์ม PBAT-CMC, Starch-Plas เนื่องจากมีส่วนผสมที่สามารถย่อยสลายได้ถึงร้อยละ 100 รองลงมาคือ LLDPE-CMC1%-TPS และ ฟิล์ม LLDPE-CMC2%-TPS เนื่องจากมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน มีความแข็งแรงและยืดหยุ่น รวมถึงมีส่วนประกอบที่สามารถย่อยสลายได้มากถึงร้อยละ 30 สุดท้ายโครงการวิจัยนี้ยังได้จัดอบรม/สัมมนา เพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้เรื่อง ไบโอพลาสติก....จากต้นน้ำสู่ปลายน้ำ พบว่าผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ 85 มีความรู้เกี่ยวกับไบโอพลาสติกมากขึ้น ผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ 65 จะนำความรู้และประสบการณ์จากเข้าร่วมโครงการไปใช้ประโยชน์ได้จริง และผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ 85 คิดว่าการอบรมส่งเสริมการนำไปปฏิบัติได้จริง

Abstract

This research study reports the industrial-scale processing of caboxymethylcellulose-based biodegradable films by blown-film extrusion technique for potential application as food packages. The process was divided into two steps: 1) processing of biodegradable plastic compound using twin-screw extrusion and 2) processing of biodegradable film from molten biodegradable plastic compound using blown-film extrusion. It was found that biodegradable plastic compounds with various formulations were successfully processed by mixing caboxymethylcellulose (not greater than 30 %w/w) with other biodegradable polymer such as polybutylene adipate terephthalate, PBAT (Ecoflex[®]) or Low-density polyethylene, LLDPE as a main component. The mixing temperature and film-blowing temperature were not exceed 170°C and 180°C, respectively. The resulting caboxymethylcellulose-based biodegradable film products showed the thickness in the range 0.020–0.028 mm, depending upon their composition and the gel formation during processing. The biodegradable plastic compounds based on Ecoflex[®] or LLDPE with high content of caboxymethylcellulose exhibited the blown-up ratio in the range 2.2–3.4 that is the normal range for industrial-scale blown-film extrusion. It was also found that the film thickness was inversely proportional to its blown-up ratio. Besides, the biodegradable plastic compounds based on LLDPE with low content of caboxymethylcellulose displayed the blown-up ratio in the range 3.0–3.2. Moreover, all film formulations showed comparable thickness of 0.020–0.027 mm that is similar to that of commodity LLDPE film. In addition, all the films with various formulations showed similar physical features e.g. translucence and smooth surface, low gel fraction and suitable thickness for film application.

The results from physical and mechanical property tests for the biodegradable films based on Ecoflex[®] or LLDPE with high content of caboxymethylcellulose revealed that LLDPE-based film showed higher Yong's modulus (20 MPa versus 7.9 MPa) , but lower elongation at break (29% versus 63%) than those of Ecoflex[®]-based film. The films with high glycerol content possessed high elongation at break, tensile strength and tensile modulus. Likewise, the films with low caboxymethylcellulose-to-water ratio exhibited high elongation at break, tensile strength and tensile modulus. The biodegradable films based on LLDPE with low content of caboxymethylcellulose demonstrated the reduction in impact strength, Young's modulus, tensile strength and elongation at break when the caboxymethylcellulose content was decreased.

In this study, several prototypes of grocery bags were produced from the blown-film products with different compositions. Although the bags showed alteration in thickness, degree of surface smoothness, physical and mechanical properties as well as color, all the films can be used efficiently as grocery bags. The results obtained from customer survey revealed that the most customer's satisfactory bag is PBAT-CMC,Starch-Plas. This was due to its 100% biodegradable composition. The second most customer's satisfactory bags are LLDPE-CMC1%-TPS and LLDPE-CMC2%-TPS. This was because of their surface smoothness, strength and flexibility as well as their biodegradable composition of 30%. Lastly, the seminar entitled "Bioplastics....from upstream to downstream" was organized. The seminar survey results disclosed that more than 85% of the participants have better knowledge about bioplastics, more than 65% of the participants can apply the knowledge in their real lives and more than 85% of the participants recommend that the knowledge obtained from the seminar can be put into practice.

สารบัญเรื่อง

	หน้า
บทที่ 1 บทนำ	1
1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย	2
1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย	2
1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย	2
1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ	4
บทที่ 2 ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	5
2.1 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	5
2.2 แป้ง	5
2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE)	11
2.4 Polybutylene adipate terephthalate (PBAT)	13
2.5 สารเติมแต่ง	13
2.6 เครื่องมือ	16
2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง	23
บทที่ 3 การทดลอง	27
3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์	27
3.2 การคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ	28
3.3 การเป่าฟิล์ม	32
3.4 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม	34
บทที่ 4 ผลการทดลองและอภิปรายผล	35
4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแป้งมันสำปะหลัง	35
4.2 การเตรียมเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ	37
4.3 การเป่าฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ	41
4.4 การทดสอบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ	48
4.5 การสำรวจความพึงพอใจของถุงหูหิ้ว	58
4.6 การจัดอบรมเพื่อประชาสัมพันธ์และถ่ายทอดเทคโนโลยี	69
บทที่ 5 สรุปผลการวิจัย	75
เอกสารอ้างอิง	77
ผลผลิต	83
ประวัตินักวิจัย	84
ภาคผนวก	

สารบัญตาราง

ตารางที่	หน้า
3.1 อัตราส่วนของการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และน้ำ	28
3.2 สูตรคอมพาวด์ของการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE	29
3.3 สูตรคอมพาวด์ของการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	30
3.4 สภาวะที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE	31
3.5 สภาวะที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	32
3.6 สภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE	33
3.7 สภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	33
4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ	38
4.2 อุณหภูมิที่ได้นวแหวน ความหนาของฟิล์ม ความกว้างของหลอดฟิล์ม และ Blow up ratio ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE	45
4.3 อุณหภูมิที่ได้นวแหวน ความหนาของฟิล์ม ความกว้างของหลอดฟิล์ม และ Blow up ratio ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	47
4.4 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE	48
4.5 สมบัติบางประการของ Ecoflex® และ LLDPE	51
4.6 ดัชนีการไหล และความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเรชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	52

สารบัญรูป

รูปที่	หน้า
2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส	5
2.2 โครงสร้างแบบอะไมโลส (ข้าว) และอะไมโลเพคติน (ข้าว) ของแป้ง	6
2.3 เม็ดแป้งยอมด้วยไอโอดีนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง	6
2.4 โครงสร้างการจัดเรียงผลึกของแป้ง	7
2.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันไดอะแกรม (X-ray diffraction diagrams) ของผลึกแป้งชนิด A B และ Vh	7
2.6 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน	8
2.7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน	9
2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน	10
2.9 เม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LLDPE และลักษณะโครงสร้างเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LDPE และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง HDPE	12
2.10 ลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของ Eco flex®	13
2.11 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด	17
2.12 เครื่องทดสอบแรงดึง Testometric รุ่น Micro 350	18
2.13 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตุ่มน้ำหนัก และระดับความสูงของตุ่มน้ำหนักตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1709	19
2.14 เครื่องมือทดสอบความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้ตุ่มน้ำหนักตกกระแทก	19
2.15 หลักการทดสอบและเครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติก	20
2.16 ส่วนประกอบของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่	21
2.17 กระบวนการเป่าฟิล์มและเครื่องเป่าฟิล์ม	22
4.1 ฟิล์มชีวภาพจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ	35
4.2 การผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แป้งมันสำปะหลัง/กลีเซอรอล/น้ำ ด้วยอัตราส่วน 35/35/27/3	36
4.3 การผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ ด้วยอัตราส่วน 33.3/33.3/33.3	36
4.4 การขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC, Starch-Plas	42
4.5 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ PBAT-CMC-Plas	42
4.6 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ PBAT-CMC, Starch-Plas	43
4.7 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC-Plas	43
4.8 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC, Starch-Plas	44
4.9 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC 1-1	44
4.10 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC 1-1 TPS	45
4.11 การฉีกขาดของฟิล์ม PBAT-CMC-Plas ขณะเป่าขึ้นรูป	46

สารบัญรูป (ต่อ)

รูปที่	หน้า
4.12	49
ฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ	
4.13	50
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE	
4.14	53
ค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่กระแทกจนฟิล์มขาดของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ ๆ	
4.15	54
มอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ ๆ	
4.16	56
ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC1%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า	
4.17	56
ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC2%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า	
4.18	57
ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC3%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า	
4.19	57
ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC4%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า	
4.20	58
ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มที่ไม่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ LLDPE-TPS ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพที่มีส่วนประกอบเหมือนกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า	
4.21	59
ถุงหิ้วจากฟิล์ม PBAT-CMC, Starch-Plas	
4.22	59
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC-Plas	
4.23	60
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC, Starch-Plas	
4.24	60
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC 1-1	
4.25	61
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC 1-1 TPS	
4.26	61
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC1%-TPS	
4.27	62
ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC2%-TPS	

บทที่ 1

บทนำ

ปัญหาสิ่งแวดล้อมและการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในกระบวนการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียม และขยะพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ใช้งานทั่วไปซึ่งไม่สามารถย่อยสลายได้ ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมมากมาย เกือบทุกประเทศทั่วโลกจึงหันมาให้ความสนใจที่จะลดการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียม โดยใช้พลาสติกชีวภาพทดแทนจากการรายงานของ The European Bioinformatics Institute ระบุว่า การผลิตพลาสติกชีวภาพทั่วโลกมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 350 ในปี ค.ศ. 2019 โดยในปี 2014 ภาพรวมการผลิตพลาสติกชีวภาพคิดเป็น 1.7 ล้านตัน [1] และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลาสติกชีวภาพมากที่สุด ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมองเห็นศักยภาพที่จะนำเปลือกทุเรียนซึ่งเป็นสารตั้งต้นที่ใช้ต้นทุนต่ำมาผลิตเป็นพลาสติกชีวภาพเพื่อใช้ในงานบรรจุภัณฑ์ และพัฒนาการผลิตให้เป็นระดับอุตสาหกรรมเพื่อช่วยขยายโอกาสในธุรกิจการผลิตและแปรรูปเม็ดพลาสติกให้ SME ไทย เพื่อให้สอดคล้องกับการพัฒนาอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม (Industrial & Green innovation) ซึ่งมุ่งเน้นการเพิ่มคุณค่าให้กับสินค้าและบริการ รวมทั้งการให้ความสำคัญกับผลกระทบทั้งในเชิงสังคมและสิ่งแวดล้อม

ในงานวิจัยที่ผ่านมาคณะผู้วิจัยประสบความสำเร็จในการนำเปลือกทุเรียน [2,3] มาพัฒนาเป็นพลาสติกชีวภาพที่มีศักยภาพในการใช้งานทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมได้ อย่างไรก็ตามการเตรียมฟิล์มชีวภาพในการวิจัยที่ผ่านมายังใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย (Solvent casting) ในระดับห้องปฏิบัติการเท่านั้น ดังนั้นในโครงการวิจัยนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีความต้องการที่จะพัฒนากระบวนการขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพในระดับอุตสาหกรรมโดยใช้เครื่องมือชนิดเดียวกับเครื่องมือที่ใช้ทั่วไปในอุตสาหกรรมการขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ทำจากพลาสติกจากปิโตรเลียม ได้แก่ เทคนิคการเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion) เพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมที่สุดในการขึ้นรูปเปรียบเทียบคุณภาพของฟิล์มที่ได้จากโครงการวิจัยนี้ กับคุณภาพของฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานทั่วไป นอกจากนี้ยังมีการทดลองใช้ต้นแบบผลิตภัณฑ์ และประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน โดยผู้ประกอบการวิสาหกิจชุมชน (OTOP) และผู้สนใจทั่วไป และจัดอบรม/สัมมนาเพื่อถ่ายทอดองค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการเกี่ยวกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป เพื่อเป็นการกระตุ้นให้ประชาชนหันมาให้ความสนใจกับพลาสติกชีวภาพให้มากขึ้น ซึ่งจะเป็นการช่วยต่อยอดให้ประเทศไทยก้าวเข้ามาเป็นผู้นำในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพของอาเซียนต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์ของโครงการวิจัย

1. สร้างองค์ความรู้และพัฒนาการผลิตพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณะ ในรูปของบรรจุภัณฑ์ ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม
2. พัฒนาเทคนิคการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ และทดลองผลิตผลิตภัณฑ์ต้นแบบเพื่อเปรียบเทียบกับบรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานทั่วไป
3. ทดลองใช้ผลิตภัณฑ์ต้นแบบ และประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน โดยผู้ประกอบการ และผู้สนใจทั่วไป
4. ถ่ายทอดองค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก และนิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ผ่านการอบรม/สัมมนา

1.2 ขอบเขตของโครงการวิจัย

โครงการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตฟิล์มต้นแบบพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในระดับอุตสาหกรรม เพื่อเป็นส่วนหนึ่งในการผลักดันให้ประเทศไทยที่มีจุดแข็งหลายด้าน อาทิ ความสำเร็จทางด้านวัตถุดิบทางการเกษตร ความพร้อมในด้านห่วงโซ่อุปทานการผลิตในอุตสาหกรรม ตลอดจนความสามารถทางเทคโนโลยีและทรัพยากรบุคคล ก้าวเข้ามาเป็นผู้นำในอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพของอาเซียนต่อไป การวิจัยนี้จะทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มต้นแบบพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม โดยใช้เครื่องขึ้นรูปที่ใช้ในโรงงานอุตสาหกรรมด้านบรรจุภัณฑ์พลาสติก (ได้รับความอนุเคราะห์การใช้เครื่องผสมและขึ้นรูปจาก บริษัทมัลติแบกซ์ จำกัด (มหาชน) อำเภอ ศรีราชา จังหวัด ชลบุรี) เปรียบเทียบคุณภาพของผลิตฟิล์มต้นแบบพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ กับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้งานทั่วไป มีการนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณะ โดยให้ผู้ประกอบการ และผู้สนใจทั่วไป ทดลองใช้ต้นแบบผลิตภัณฑ์ และประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน สุดท้ายจะได้ถ่ายทอดองค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการเกี่ยวกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ผ่านการอบรม/สัมมนา เพื่อเพิ่มโอกาสให้ผู้ประกอบการที่สนใจเข้าถึงองค์ความรู้ เทคโนโลยี การผลิตฟิล์มต้นแบบจากเปลือกทุเรียนที่มีฤทธิ์ในการต้านจุลินทรีย์ จากนักวิชาการ/วิจัยได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งข้อมูลที่ได้ อาจเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจลงทุนในธุรกิจเกี่ยวกับการแปรรูปเม็ดพลาสติกชีวภาพในอนาคตต่อไป

1.3 กรอบแนวคิดของโครงการวิจัย

สืบเนื่องจากราคาของวัตถุดิบตั้งต้นในการผลิตพลาสติกย่อยสลายได้ พอลิแลคติกแอซิด หรือ PLA ที่ใช้มากในงานบรรจุภัณฑ์อาหาร คือแป้ง น้ำตาล หรือกากน้ำตาล มีราคาสูง และต้องนำเข้าจากประเทศ เนื่องจาก ณ ปัจจุบัน โรงงานผลิตเม็ดพลาสติก PLA ในประเทศไทยมีเพียงแห่งเดียวเท่านั้น คณะผู้วิจัยจึงได้นำขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรที่มีส่วนประกอบของเซลลูโลสอยู่กว่าร้อยละ 30 เช่น เปลือกทุเรียน ซึ่งมีอยู่มากในภาคตะวันออกของ

ประเทศ มาพัฒนาเป็นพลาสติกชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ซึ่งเป็นทางเลือกหนึ่งของฟิล์มบรรจุภัณฑ์จากพลาสติกชีวภาพ และพบว่าสามารถพัฒนาและปรับปรุงสมบัติของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในระดับห้องปฏิบัติการได้ นอกจากนี้การศึกษาสมบัติของฟิล์มชนิดนี้สรุปได้ว่าฟิล์มดังกล่าวมีศักยภาพที่จะพัฒนาไปเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์ได้ คณะผู้วิจัยจึงได้พัฒนาฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพและมีฤทธิ์ในการต้านจุลินทรีย์ขึ้น และพัฒนาสูตรของฟิล์มที่มีสมบัติเหมาะสมที่สุดเพื่อขึ้นรูปและพัฒนาให้เป็นบรรจุภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไปด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์มและใช้เครื่องมือขึ้นรูปที่ใช้ขึ้นรูปฟิล์มบรรจุภัณฑ์ที่ใช้ในอุตสาหกรรมทั่วไป เพื่อเป็นแนวทางให้ผู้ประกอบการทั่วไปสามารถใช้เครื่องจักรที่ผลิตฟิล์มพลาสติกแบบเดิมได้ หากสนใจที่จะผลิตฟิล์มย่อยสลายได้ทางชีวภาพทดแทน

การเป่าฟิล์ม (Blown film extrusion) เป็นเทคโนโลยีในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป และมีความสำคัญที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ [4] กระบวนการเป่าฟิล์ม [5] เริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกมาหลอมที่อุณหภูมิเหมาะสมอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืด ซึ่งจะถูกดันให้ไหลผ่านรูเปิด (die) ทรงกลม จากนั้นเป่าลมเข้าทางศูนย์กลาง die แรงดันลมจะทำให้พลาสติกเหลวพองออกลักษณะเป็นลูกโป่งฟิล์ม ผู้ควบคุมต้องทำการควบคุมแรงดันลมคงที่โดยการควบคุมให้ปริมาณลมเข้าเท่ากับปริมาณลมออก เพื่อให้ฟิล์มมีความหนาสม่ำเสมอ เมื่อได้ความหนาที่ต้องการโป่งฟิล์มจะถูกดึงออกจาก die อย่างต่อเนื่องและเย็นตัวลงโดยการเป่าลมจากภายนอก และหากต้องการให้ด้านในโป่งฟิล์มเย็นลงก็สามารถทำได้โดยการใช้ระบบทำความเย็นภายในแบบพองอากาศ (internal bubble cooling) หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้ว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบเป็นแผ่นโดย nip rollers แล้วแผ่นฟิล์มก็จะถูก puller rolls ดึงให้ตึงและส่งเก็บเข้าม้วนที่ windup โดยที่ระหว่าง nip rollers และ windup rollers อาจมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเช่น เครื่องระเบิดผิวฟิล์ม, เครื่องตัดประจุไฟฟ้าหรือเครื่องตัดฟิล์มเพื่อแยกเป็นแผ่น เป็นต้น

ในการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยพบว่ายังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยการเป่าฟิล์ม สืบเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (270 °C) [6] ในโครงการวิจัยนี้จึงทำการผสมสารพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล [7] เพื่อลดอุณหภูมิหลอมเหลวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หาปริมาณของกลีเซอรอลที่เหมาะสมและสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์ม [4] เช่น อุณหภูมิในแต่ละโซน ความหนืดของพอลิเมอร์หลอม ความเร็วรอบของสกรู แรงดันลม ความหนาของฟิล์ม การทำให้เย็น เป็นต้น

เมื่อได้สภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพแล้ว คณะผู้วิจัยจะได้ศึกษาสมบัติของผลิตภัณฑ์ฟิล์มต้นแบบที่ได้ เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สัณฐานวิทยา เป็นต้น เพื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ใช้งานทั่วไป เช่น PE PP เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้มีการนำผลิตภัณฑ์ต้นแบบที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในเชิง

สาธารณะ โดยให้ผู้ประกอบการ และผู้สนใจทั่วไปทดลองใช้ต้นแบบผลิตภัณฑ์ และประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน สุดท้ายจะได้ถ่ายทอดองค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการเกี่ยวกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก นิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ผ่านการอบรม/สัมมนา เพื่อเพิ่มโอกาสให้ผู้ประกอบการที่สนใจเข้าถึงองค์ความรู้ เทคโนโลยี การผลิตฟิล์มคาร์บอนซีเมติกเซลลูโลสเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ จากนักวิชาการ/วิจัย ได้โดยไม่เสียค่าใช้จ่าย ซึ่งข้อมูลที่ได้ อาจเป็นส่วนหนึ่งในการตัดสินใจลงทุนในธุรกิจเกี่ยวกับการแปรรูปเม็ดพลาสติกชีวภาพในอนาคตต่อไป

1.4 ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

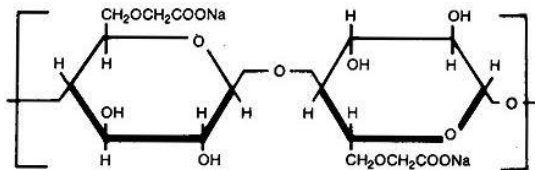
1. ผลิตผลงานวิจัย องค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีจากงานวิจัยในรูปแบบสหวิทยาการ
2. ลดการนำเข้าเม็ดพลาสติกชีวภาพ ลดการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียม
3. เพิ่มมูลค่าให้กับสินค้าเกษตร และขยะเหลือทิ้งจากการเกษตร (มันสำปะหลังและเปลือกทุเรียน) ช่วยให้เกษตรกรมีช่องทางการจำหน่ายสินค้าเพิ่มขึ้น
4. กระตุ้นโอกาสในการเพิ่มผู้ประกอบการแปรรูปเม็ดพลาสติกชีวภาพ
5. กระตุ้นให้ผู้คนเห็นความสำคัญของการใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกชีวภาพ
6. ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่เกิดจากการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียมที่ไม่ย่อยสลาย
7. ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่เกิดจากอุตสาหกรรมการผลิตพลาสติกจากปิโตรเลียม

บทที่ 2

ทฤษฎีและการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

2.1 คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หรือโซเดียมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (Sodium carboxymethyl cellulose) เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสในรูปอีเทอร์ ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืด และจัดเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ (Hydrocolloid) ประเภท พอลิเมอร์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic) [9] ความสามารถในการละลายของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ขึ้นกับความความสามารถในการแทนที่หมู่ฟังก์ชัน (Degree of substitution, D.S.) ซึ่งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ที่มีความสามารถในการแทนที่หมู่ฟังก์ชันมากจะละลายน้ำได้ดี อัตราการซึมผ่านไอน้ำสูง และเมื่อความเข้มข้นของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในน้ำเพิ่มขึ้น จะทำให้เกิดการเชื่อมขวาง (Crosslinking) ของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสได้สูงขึ้น [10]



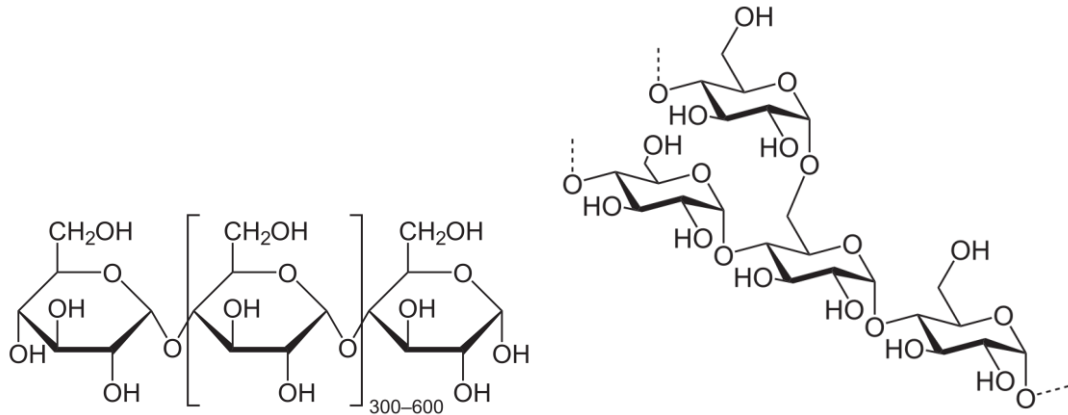
รูปที่ 2.1 โครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส [8]

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เป็นสารเพิ่มความหนืดที่ช่วยยึดเกาะและคงสภาพ นอกจากนี้ยังเป็นพอลิเมอร์ที่มีความเป็นประจุจึงสามารถละลายได้ในสารละลายที่มีขั้วสูง เช่น น้ำ มีความคงตัวสูงในช่วง pH 4.0-10.0 และมีความหนืดสูงในช่วง pH 7.0-9.0 โดยความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จะลดลงเมื่อพีเอชลดลงและอุณหภูมิเพิ่มขึ้น คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ไม่มีกลิ่น ไม่มีรส ไม่เป็นอันตราย และไม่มีผลเสียต่อสิ่งแวดล้อม จึงมีการใช้งานอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมหลายประเภท เช่น อุตสาหกรรมการชักฟอก สี กาว สิ่งทอ กระดาษ เซรามิก อาหารและยา เป็นต้น [9]

2.2 แป้ง

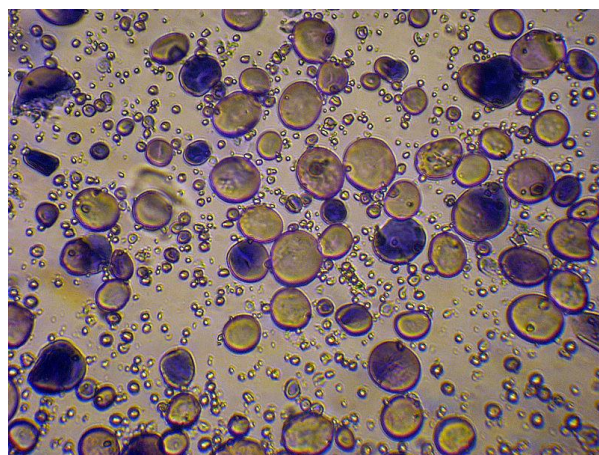
แป้งเป็นพอลิแซคคาไรด์จัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่เกิดจากกลูโคสจำนวนหลายพันโมเลกุลมาต่อกันเป็นสายยาว แป้งมีโครงสร้างเป็นทั้งแบบสายยาว (อะไมโลส) และกิ่งก้านสาขา (อะไมโลเพคติน) แป้งมีมากในพืช

ประเภทเมล็ดและหัว เมื่อแปงถูกความร้อนจะกลายเป็นเด็กซ์ทริน ซึ่งเป็นสารที่มีรสหวานเล็กน้อยและมีสมบัติเหนียวแบบกาว โครงสร้างของแปงประกอบด้วยพอลิเมอร์ของกลูโคสสองชนิดคือ โครงสร้างอะไมโลส ไม่มีกิ่ง ต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ $\alpha 1 \rightarrow 4$ พบประมาณร้อยละ 15 – 20 และโครงสร้างแบบอะไมโลเพคติน ซึ่งเป็นสายพอลิแซคคาไรด์ที่มีกิ่ง โดยส่วนที่เป็นเส้นตรงต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ $\alpha 1 \rightarrow 4$ และส่วนที่มีกิ่งต่อกันด้วยพันธะไกลโคซิดิกแบบ ($\alpha 1 \rightarrow 6$) พบประมาณร้อยละ 80 – 85 ดังแสดงในรูปที่ 2.2



รูปที่ 2.2 โครงสร้างแบบอะไมโลส (ซ้าย) และอะไมโลเพคติน (ขวา) ของแปง [11]

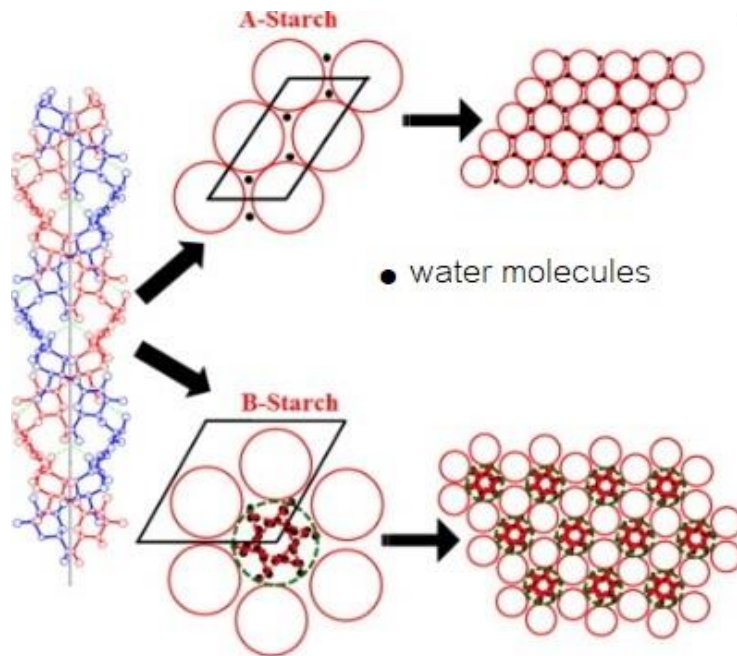
แปงที่พบในธรรมชาติพบอยู่ในรูปเม็ดแปงขนาด 1-100 ไมครอน เมื่อตรวจสอบลักษณะ ของเม็ดแปงชนิดต่างๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์ธรรมดา และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอน (Scanning Electron Microscope; SEM) พบว่าเม็ดแปงจะมีขนาด รูปร่าง และลักษณะแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดและองค์ประกอบทางเคมีของแปง [11]



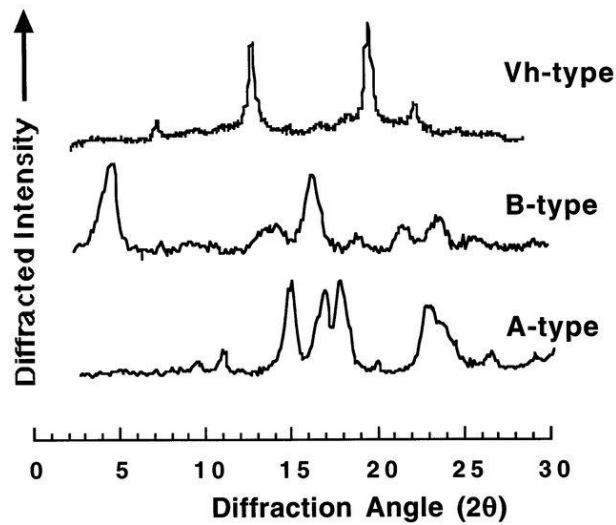
รูปที่ 2.3 เม็ดแปงย้อมด้วยไอโอดีนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง [11]

2.2.1 โครงสร้างของเม็ดแป้ง

เม็ดแป้งมีลักษณะโครงสร้างผลึก 3 แบบ ขึ้นอยู่กับลักษณะในการจัดเรียงตัวของเกลียวคู่ ได้แก่ แบบ A แบบ B และ แบบ Vh ถ้ามีการเรียงตัวหนาแน่นมากและมีปริมาณน้ำต่ำ จัดเป็นผลึกแบบ A (แป้งจากธัญพืชต่างๆ) ถ้ามีการเรียงตัวกันหลวมๆ และมีปริมาณน้ำสูงจะจัดเป็นผลึกแบบ B (แป้งจากพืชหัว) ดังรูปที่ 2.4-2.5 [12]



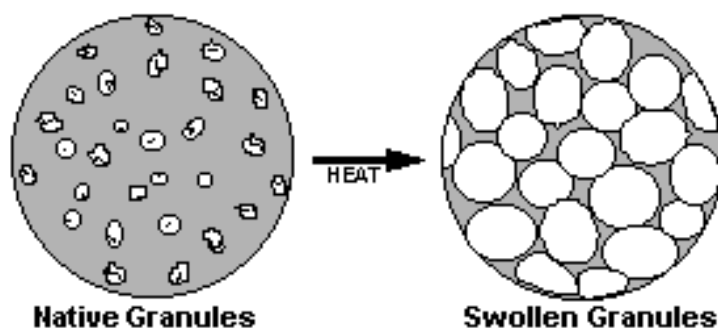
รูปที่ 2.4 โครงสร้างการจัดเรียงผลึกของแป้ง [12]



รูปที่ 2.5 เอกซ์เรย์ดิฟแฟรกชันไดอะแกรม (X-ray diffraction diagrams) ของผลึกแป้งชนิด A B และ Vh [13]

2.2.2 สมบัติของแป้ง

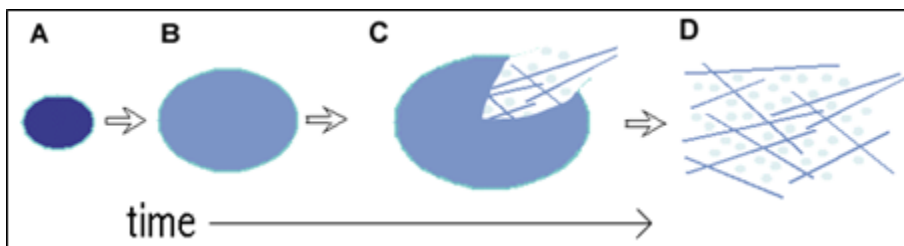
แป้งไม่ละลายในน้ำเย็นแต่จะดูดซึมน้ำไว้ได้ประมาณร้อยละ 25-30 และพองตัวน้อยมากจนไม่สังเกตเห็นได้ ทั้งนี้เนื่องจากการจัดเรียงตัวกันระหว่างโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคติน (intermixed) ภายในเม็ดแป้งในส่วนโครงสร้างที่เป็นผลึก โมเลกุลแป้งอยู่กันอย่างหนาแน่นและเป็นระเบียบ ทำให้ไม่ละลายในน้ำเย็น ส่วนโครงสร้างที่เป็นอสัณฐานซึ่งไม่เป็นระเบียบและมีหมู่ไฮดรอกซิลอิสระมาก สามารถเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ (Hydration) ได้บ้างแม้ในน้ำเย็น เมื่อให้ความร้อนกับน้ำแป้งจะมีอุณหภูมิสูงขึ้นประมาณ 60 องศาเซลเซียส ขึ้นไป โมเลกุลที่จัดเรียงเป็นระเบียบในส่วนผลึกเริ่มคลายตัวออกจากกันและเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำ ทำให้เม็ดแป้งพองตัวเพิ่มขึ้น (รูปที่ 2.6) และโมเลกุลของแป้งอยู่ในสภาพสลายมากขึ้น [14]



รูปที่ 2.6 การพองตัวของเม็ดแป้งเมื่อได้รับความร้อน [14]

ดังนั้นเมื่อนำแป้งใส่น้ำเย็น เม็ดแป้งดูดซึมน้ำได้ในปริมาณที่จำกัดเท่านั้นจึงยังไม่พองตัวหรือพองตัวได้น้อยมาก และสังเกตได้ยาก และปรากฏการณ์นี้สามารถผันกลับได้ (Reversible) โดยเมื่อนำไปอบแห้งก็จะได้แป้งที่มีลักษณะและสมบัติเหมือนเดิม แต่เมื่อให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิหนึ่งประมาณ 60-75 องศาเซลเซียส หรือใช้สารเคมี เช่น ความร้อนที่มากพอจะมีผลทำให้การจับยึดกันระหว่างโมเลกุลของแป้งในส่วนผลึกลดลง เกิดปฏิกิริยาการรับน้ำและการพองตัวของเม็ดแป้ง ซึ่งไม่สามารถผันกลับได้ (Irreversible) และทำให้สารละลายแป้งมีความหนืดและความใสเพิ่มขึ้น กระบวนการนี้เรียกว่า “เจลาติไนเซชัน (Gelatinization)” ในกระบวนการนี้ เม็ดแป้งมีการพองตัวอย่างชัดเจน และอุณหภูมิที่ทำให้เกิดกระบวนการนี้ขึ้นกับชนิดของแป้ง เนื่องจากแป้งแต่ละชนิดมีโครงสร้างผลึกที่แตกต่างกัน โดยทั่วไป ระดับการจับกัน (Degree of association) และความสม่ำเสมอของการเกิดเจลาติไนเซชันจะเกิดไม่พร้อมกันทุกเม็ด แม้แต่ในแป้งชนิดเดียวกันจากแหล่งเดียวกันอาจมีช่วงอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันที่ห่างกันถึง 8-10 องศาเซลเซียส โดยทั่วไปเม็ดแป้งขนาดใหญ่จะเกิดเจลาติไนเซชันได้ก่อนขนาดเล็ก [14] โดยลำดับการเปลี่ยนแปลงเริ่มจากการพองตัวในส่วนที่เป็นอสัณฐานซึ่งมีระเบียบน้อยที่สุดคือในส่วน และการ

พองตัวนี้จะทำให้ผลึกแป้งที่อยู่ข้างเคียงทำให้โครงสร้างเสียหาย หากให้ความร้อนต่อไปจะเกิดการแตกตัว (Uncoiling) ของโครงสร้างผลึกส่วนที่เป็นเกลียวคู่ (Double helical region) ต่อด้วยเกิดการแตกออกของโครงสร้างผลึก และสายกิ่งของอะไมโลเพคตินที่แยกตัวออกมาจะถูกล้อมรอบด้วยโมเลกุลของน้ำ และมีการพองตัวไปในแนวรอบๆ และเกิดแรงเค้นต่อโครงสร้างผลึกที่ยังเหลืออยู่ จากนั้นโมเลกุลของแป้งจะเกิดปฏิกิริยาการรับน้ำต่อไป และทำให้โมเลกุลแป้งเกิดการเคลื่อนที่ได้มากขึ้น และเกิดการกระจายตัวของโมเลกุลเพิ่มขึ้น โมเลกุลของอะไมโลสซึ่งมีขนาดเล็กจะแพร่ออกมาจากเม็ดแป้งที่พองตัวอยู่ (Swollen granule) การให้ความร้อนต่อไปจะทำให้เม็ดแป้งที่พองตัวอยู่แตกออกมากขึ้นจนในที่สุดได้เป็นสารละลาย เรียกว่าน้ำแป้งสุก

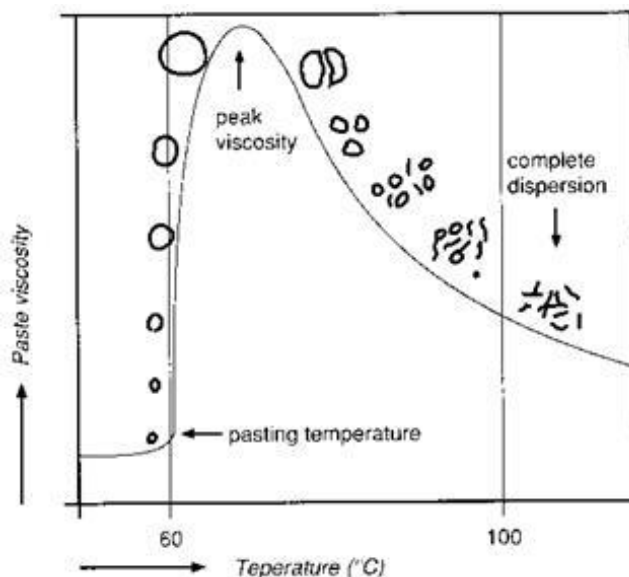


รูปที่ 2.7 การเปลี่ยนแปลงของเม็ดแป้งขณะให้ความร้อน [14]

เมื่อน้ำแป้งสุกซึ่งร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลง ขณะที่อุณหภูมิลดลง โมเลกุลอิสระของอะไมโลสซึ่งอยู่ใกล้กันจะเคลื่อนที่เข้ามาใกล้กันและจับตัวกันด้วยพันธะไฮโดรเจน ทำให้เกิดสภาพการจัดเรียงตัวของโมเลกุลขึ้นใหม่ โดยเปลี่ยนจากลักษณะการกระจายตัวของโมเลกุลมาจัดเรียงเป็นโครงสร้างผลึก ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นต่ำ การจัดเรียงตัวของโมเลกุลเหล่านี้จะทำให้เกิดลักษณะตะกอนขุ่นขาว แต่ถ้าน้ำแป้งสุกมีความเข้มข้นสูง เช่น แป้งข้าวโพดความเข้มข้น 7 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก จำนวนโมเลกุลที่มาจัดเรียงตัวกันใหม่มีมากและระหว่างเคลื่อนที่เข้ามาจับกันจะสามารถเก็บกักน้ำไว้ได้ ทำให้ความหนืดเพิ่มขึ้นและเกิดลักษณะเจลที่อ่อนนุ่ม [14] การคั้นตัวของน้ำแป้งโดยทั่วไปจะเกิดได้ดีเมื่อน้ำแป้งมีความเข้มข้นสูง และทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิต่ำ แป้งแต่ละชนิดมีอัตราการคั้นตัวของน้ำแป้งสุกแตกต่างกัน โดยทั่วไปแป้งจากราก หัว มีอัตราการคั้นตัวช้ากว่าแป้งจากธัญพืช ทั้งนี้เป็นเพราะแป้งจากราก/หัว เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวมากและเร็ว และเม็ดแป้งแตกง่าย ทำให้โมเลกุลแป้งทั้งหมดกระจายอยู่ทั่วไปในน้ำแป้ง ยากที่โมเลกุลอะไมโลสจะมาจัดเรียงตัวกันได้ใหม่ แต่แป้งจากธัญพืช เมื่อได้รับความร้อนจะพองตัวน้อยกว่า เม็ดแป้งแตกน้อย โมเลกุลที่คลายตัวยังอยู่ใกล้ชิดกันจึงเคลื่อนที่จับกันใหม่ได้ง่าย ซึ่งอาจจับตัวกันระหว่างเม็ดแป้งที่พองตัวซึ่งอยู่ใกล้กัน หรือระหว่างชิ้นส่วนของเม็ดแป้งหรือโมเลกุลอะไมโลสอิสระที่หลุดออกมา ขนาดโมเลกุลของอะไมโลสในแป้งแต่ละชนิดมีผลในการเกิดการคั้นตัวของน้ำแป้งสุกด้วย โมเลกุลอะไมโลสที่มีขนาดพอเหมาะในการเคลื่อนที่มาจับกัน คือ ในช่วง 100-200 หน่วยกลูโคส ถ้าโมเลกุลใหญ่ เช่น แป้งมันฝรั่ง

มีอะไมโลสขนาดใหญ่ประมาณ 1,000-6,000 หน่วยกลูโคส จะเคลื่อนที่เข้ามาจับกันได้ยาก และถ้าโมเลกุลสั้นเกินไปจะเคลื่อนไหวอยู่ตลอดเวลา (Brownian movement) ทำให้จับกันยากเช่นกัน [14]

ขณะที่เม็ดแป้งพองตัว ความหนืดของสารละลายแป้งจะเพิ่มขึ้นเร็วมาก อุณหภูมิที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วนี้เรียกว่า Pasting temperature ความหนืดจะเพิ่มขึ้นจนถึงความหนืดสูงสุด (Peak viscosity) จากนั้นอาจลดลงหรือคงที่ขึ้นกับชนิดของแป้ง การที่แป้งมีความหนืดสูงที่สุดเนื่องจากเมื่อเม็ดแป้งมีการพองตัวมากขึ้น และมีชิ้นส่วนของเม็ดแป้ง และหรือโมเลกุลของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินบางส่วนที่แตกสลายออกมาอยู่ในสารละลาย เมื่อส่วนที่แตกสลายและละลายออกมามีมากกว่าการพองตัวที่เพิ่มความหนืดจะเริ่มลดลง ซึ่งจะเห็นได้ชัดเมื่ออยู่ในช่วงการหุงต้มที่ 95 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ดังนั้นค่าความหนืดของน้ำแป้งสุกจะเป็นผลมาจากการพองตัวของเม็ดแป้ง และการแตกหักของเม็ดแป้งร่วมกับการละลายออกมาของโมเลกุลแป้ง [14]



รูปที่ 2.8 การเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งเมื่อให้ความร้อน [14]

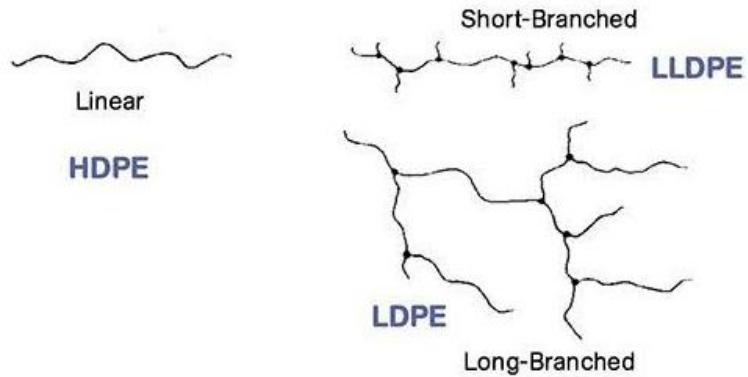
เมื่อลดอุณหภูมิลง โมเลกุลอิสระที่กระจัดกระจายออกมา (โดยเฉพาะส่วนของอะไมโลส) ถ้ามีขนาดโมเลกุลที่เหมาะสมคือ ไม่สั้นและยาวเกินไปก็จะสามารถเคลื่อนที่เข้ามาจับกัน และกักน้ำไว้ได้ทำให้ความหนืดสูงขึ้นอีก ความหนืดที่กลับสูงขึ้นนี้อีกนี้เรียกว่า Setback และปรากฏการณ์นี้ก็คือการคืนตัวของแป้ง (Retrogradation) ปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดได้แก่ ชนิดของแป้ง ขนาดอนุภาค สัดส่วนของอะไมโลสต่ออะไมโลเพคติน อุณหภูมิ เป็นต้น แต่ที่มีผลมากที่สุดได้แก่ชนิดของแป้ง [14]

2.2.3 เทอร์โมพลาสติกจากแป้ง (Thermoplastic starch, TPS)

แป้งเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติแบบเทอร์โมพลาสติกที่ประกอบด้วยกลูโคส (Anhydroglucose unit) เป็นหน่วยซ้ำ (repeating unit) ของโมเลกุลอะไมโลสและอะไมโลเพกติน ในแต่ละหน่วยซ้ำประกอบไปด้วยหมู่ไฮดรอกซิล 3 หมู่ ซึ่งสามารถเกิดพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลข้างเคียงได้ ทำให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลซึ่งมีค่าสูงมาก ดังนั้น ในการขึ้นรูปแป้งถ้าหากไม่มีการเติมสารพลาสติกไซเซอร์จะพบว่าเมื่อมีการให้ความร้อนเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ แทนที่จะทำให้โมเลกุลพอลิเมอร์และองค์ประกอบในแป้งสามารถเคลื่อนที่ผ่านซึ่งกันและกันได้กลับทำให้โมเลกุลของพอลิเมอร์ในแป้งเกิดการสลายตัวแทน ซึ่งเป็นการแสดงสมบัติของพอลิเมอร์แบบเทอร์โมเซต [15] ดังนั้น การเติมสารประเภทพลาสติกไซเซอร์จึงช่วยลดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้ง โดยโมเลกุลของพลาสติกไซเซอร์จะไปสร้างพันธะไฮโดรเจนกับหมู่ไฮดรอกซิลของโมเลกุลแป้ง ทำให้พันธะไฮโดรเจนที่เกิดขึ้นระหว่างสายโซ่โมเลกุลของแป้งด้วยกันเองลดน้อยลง สายโซ่โมเลกุลของแป้งจึงสามารถเคลื่อนที่ผ่านกันได้ง่ายขึ้น โดยใช้พลังงานลดลง และทำให้แป้งมีสมบัติเป็นเทอร์โมพลาสติก

2.3 พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LLDPE)

พอลิเอทิลีนเป็นพอลิเมอร์ที่เกิดจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันของเอทิลีนมอนอเมอร์ พอลิเอทิลีนแบ่งออกเป็นหลายประเภทโดยใช้ความหนาแน่นเป็นเกณฑ์ ได้แก่ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (LDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นปานกลาง (MDPE) และ พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง (HDPE) พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ (Linear low-density polyethylene หรือ LLDPE) จัดเป็นพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำที่มีโครงสร้างโมเลกุลเป็นเส้นตรงที่ประกอบด้วยกิ่งสั้นๆ (Short branches) จำนวนมาก จึงต่างจากพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำปกติ (Conventional low-density polyethylene (LDPE)) เนื่องจาก LDPE ประกอบด้วยกิ่งที่ยาวกว่า และมีกระบวนการสังเคราะห์ที่แตกต่างกัน โดยทั่วไป LLDPE สังเคราะห์จากปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันระหว่างเอทิลีนมอนอเมอร์กับแอลฟาโอเลฟินส์ (Alpha-olefins) ได้แก่ บิวทีน (Butene) เฮกซีน (Hexene) หรือ ออกทีน (Octene) ที่ความดันและอุณหภูมิต่ำ ปฏิกิริยาโคพอลิเมอร์ไรเซชันของ LLDPE จึงให้ผลิตภัณฑ์ LLDPE ซึ่งมีการกระจายน้ำหนักโมเลกุลต่ำกว่า LDPE อีกทั้งโครงสร้างของโมเลกุลมีลักษณะเป็นเส้นตรงมากกว่า LDPE พอลิเมอร์ทั้งสองชนิดจึงมีพฤติกรรมการไหลแตกต่างกันเมื่อนำเข้ากระบวนการขึ้นรูป ตัวอย่างเม็ดพลาสติก LLDPE ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ และโครงสร้างของ LLDPE เมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดอื่น แสดงดังรูปที่ 2.9



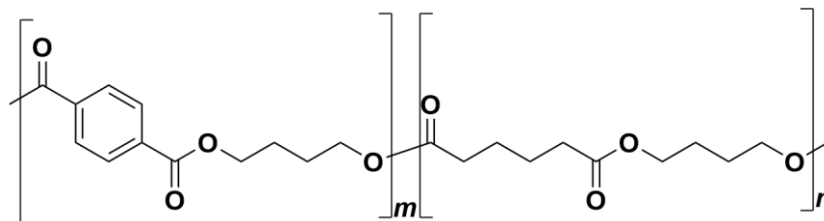
รูปที่ 2.9 เม็ดพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LLDPE และลักษณะโครงสร้างเมื่อเทียบกับพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LDPE และพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นสูง HDPE [16]

LLDPE สังเคราะห์ขึ้นจากปฏิกิริยาพอลิเมอร์ไรเซชันในเฟสของสารละลายหรือเฟสของแก๊สโดยใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาแบบ Ziegler หรือ Philips จัดเป็นพอลิเมอร์ที่มีค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) และความทนต่อแรงกระแทก และการทิ่มแทง (Impact and puncture resistance) สูงกว่า LDPE มีความยืดหยุ่นและดึงยึดได้ดีมาก จึงสามารถทำเป็นฟิล์มบางที่มีความทนต่อการฉีกขาดได้ดี มีความทนต่อสารเคมี แต่มีความมันวาวและทนต่อความร้อนน้อยกว่า LDPE [17] เนื่องจาก LLDPE มีความทนต่อแรงเฉือนน้อย ดังนั้นในการขึ้นรูปผลิตภัณฑ์จาก LLDPE ที่ผ่านกระบวนการที่มีแรงเฉือน เช่น กระบวนการอัดรีด (Extrusion) สายโซ่โมเลกุลของ LLDPE จึงคลายตัวได้เร็วเมื่อผ่านกระบวนการหลอมอัดรีด ดังนั้นสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์ที่ได้จึงเปลี่ยนไปตามสถานะที่ใช้ในกระบวนการขึ้นรูป

LLDPE นิยมนำไปใช้เป็นผลิตภัณฑ์ประเภทฟิล์มหรือซีท เช่น ถุงพลาสติก พลาสติกห่ออาหาร พลาสติกยืดหยุ่น ผ้าคลุม ของเล่น ท่อ บรรจุภัณฑ์ เป็นต้น หลังการใช้งานผลิตภัณฑ์จาก LLDPE สามารถนำไปขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ใหม่ หรือรีไซเคิลได้ แต่สมบัติทางกายภาพจะแย่งลง

2.4 Polybutylene adipate terephthalate (PBAT)

พอลิบิวทิลีนอะดิเพทเทเรพทาเลท หรือ PBAT หรือ พอลิบิวทิลีนอะดิเพทโคเทเรพทาเลท (Poly(butylene adipate-co-terephthalate) หรือ พอลิบิวทิลเรต-อะดิเพท-เทเรพทาเลท (Polybutyrate-adipate-terephthalate) [18] หรือพอลิบิวทิลเรต (Polybutyrate) [19] จัดเป็นโคพอลิเมอร์แบบสุ่ม (Random copolymer) ที่สามารถย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพ โดยเฉพาะ PBAT ที่ได้จากปฏิกิริยาระหว่างกรดอะดิปิก (Adipic acid), 1,4-บิวทีนไดออล (1,4-butanediol) และ เทเรพทาลิกแอซิด (Terephthalic acid) ชื่อทางการค้าของ PBAT ตั้งตามผู้ผลิตมีหลายชื่อ ได้แก่ Ecoflex®, Wango, Ecoworld, Eastar Bio และ Origo-Bi เป็นต้น จัดเป็นพอลิเมอร์ย่อยสลายตามธรรมชาติที่มีสมบัติความยืดหยุ่น (Flexibility) และความทนทาน (Resistance) ใกล้เคียงกับ LDPE จึงนิยมนำมาผลิตเป็นถุงพลาสติก และฟิล์มพลาสติก เช่นเดียวกับ LDPE รูปที่ 2.10 แสดงลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของ Ecoflex®



รูปที่ 2.10 ลักษณะทางกายภาพ และโครงสร้างของ Ecoflex® [20]

2.5 สารเติมแต่ง

สารเติมแต่ง (Additives) คือสารที่เติมหรือผสมลงในพอลิเมอร์เพื่อวัตถุประสงค์ในการปรับปรุง และ/หรือเปลี่ยนแปลงสมบัติของพอลิเมอร์ อาทิ สมบัติเชิงกล สมบัติทางกายภาพ และสมบัติทางเคมี ให้เหมาะกับการใช้งาน [21] เช่น ปกป้องพอลิเมอร์จากการเสื่อมสภาพเนื่องจากปัจจัยต่างๆ เช่น แสง ความร้อน และแบคทีเรียปรับเปลี่ยนสมบัติต่างๆ เช่น ความหนาแน่น ความลื่น การทนทานต่อการติดไฟ ลดการขยายตัวเนื่องจากความ

ร้อน การทำให้สีของพอลิเมอร์มีความคงทน เพิ่มความสามารถในการย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ เพิ่มการนำไฟฟ้า เพิ่มความสามารถในการทนไฟ เป็นต้น สารเติมแต่งในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ (Processing additive) คือ วัสดุที่เติมลงไปในการประกอบพอลิเมอร์เพื่อปรับปรุงกระบวนการโดยไม่ทำให้สมบัติเชิงกลเปลี่ยนแปลงไปในทางลบ และเพื่อช่วยลดปัญหาที่เกิดขึ้นในกระบวนการขึ้นรูปพอลิเมอร์ เช่น ความหนืดสูง การกระจายตัวไม่ดี ความร้อนสูง ผิวหน้าไม่เรียบ เกิดฟองอากาศขึ้นในชิ้นงาน แกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก เป็นต้น ปัญหาต่างๆ เหล่านี้สามารถแก้ไขได้โดยการเติมสารเติมแต่ง ซึ่งมีหน้าที่ในการปรับสมบัติต่างๆ ของพอลิเมอร์ให้ดีขึ้น สำหรับสารเติมแต่งที่ใช้ในการขึ้นรูปมีจุดประสงค์ในการเติมที่แตกต่างกันไป [22]

สารหล่อลื่น (Lubricant) นิยมเรียกเป็นสารแยกส่วน (Parting agents) โดยสามารถเป็นได้ทั้งสารหล่อลื่นภายใน และสารหล่อลื่นภายนอก เช่น นำมาใช้กับผิวของแม่พิมพ์ ทำให้เกิดเป็นฟิล์มบางเกาะผิวของโลหะ ช่วยป้องกันไม่ให้ผิวของโลหะเปื่อย หรือเป็นสารหล่อลื่นในสารประเภทเทอร์โมพลาสติกและเทอร์โมเซตที่ช่วยป้องกันปัญหาแกะชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ได้ยาก เป็นต้น [23-25] สารหล่อลื่นช่วยให้แรงเสียดทานระหว่างโมเลกุลลดลงจึงช่วยปรับปรุงสมบัติการไหลของพอลิเมอร์ และลักษณะการไหลให้ดีขึ้น นอกจากนี้ยังช่วยลดอุณหภูมิของกระบวนการลง ช่วยให้พอลิเมอร์หลอมรวมเป็นเนื้อเดียวกับองค์ประกอบอื่น ช่วยประหยัดพลังงาน และเพิ่มผลผลิต นอกจากนี้สารหล่อลื่นยังมีหน้าที่อื่น ได้แก่ ช่วยให้เม็ดพลาสติกที่มีสารหล่อลื่นอยู่ไหลในอุปกรณ์ป้อนวัสดุได้ดี ควบคุมความร้อนเนื่องจากแรงเสียดทานและอัตราการหลอมเหลว ลดความหนืดของพลาสติกหลอม และลดพลังงานที่ต้องใช้ ลดการบวมของหัวตาย (Die) ลดการเสียคุณภาพเนื่องจากแรงเฉือน (Shear degradation) ช่วยให้พอลิเมอร์หลุดออกจากอุปกรณ์ทางกระบวนการ เช่น ตาย แม่พิมพ์ หรือลูกกลิ้งได้ง่ายขึ้น เพิ่มความเงา (Gloss) ใช้เป็นสารช่วยยึดเกาะ ได้แก่ สารป้องกันการบดบัง (Anti-blocking) ในไวนิลส์ และสารทำให้เกิดการลื่นไถล (Slip agents) ในพอลิโอเลฟินส์ โดยสารทั้งสองชนิดนี้อาจทำหน้าที่เป็นสารป้องกันการเกิดหมอกในตู้เย็น ผลิตภัณฑ์ที่เย็นจัด และสารป้องกันการเกิดไฟฟ้าสถิตย์ เป็นต้น นอกจากนี้ยังใช้เป็นสารหล่อลื่นในเกียร์และฝาประกับเพล่า ที่นิยมใช้ ได้แก่ โมดิบดินีมซัลไฟด์ (MoS₂) ทองเหลือง กราไฟต์ ผงพอลิเอทิลีน และผงเทลลอน

สารหล่อลื่นภายใน (Internal lubricants) หมายถึงสารหล่อลื่นที่ละลายได้ดีในพอลิเมอร์ และทำหน้าที่เหมือนกับสารปรับสภาพพลาสติก หรือเป็นพอลิเมอร์ที่มีน้ำหนักโมเลกุลต่ำที่ช่วยให้แรงยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลแยกออก เกิดการไหลไปมาได้ [23] จึงช่วยลดความหนืดของพอลิเมอร์หลอมได้ เช่น สารหล่อลื่นภายในที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้แก่ ไกลคอลมอนอสเตียเรต (Glycol monostearate, GMS) บิวทิล สเตียเรต (Butyl

stearate) และกลีเซอรอล ไตสเตียเรต (Glyceryl distearate) ส่วนสารหล่อลื่นภายนอก (External lubricant) จัดเป็นสารที่ละลายเข้ากันได้เพียงบางส่วนหรือไม่เข้ากันเลย (Semi-compatible or incompatible) กับพอลิเมอร์ และอยู่ที่พื้นผิว ทำให้พอลิเมอร์ให้หลุดออกจากอุปกรณ์ในกระบวนการได้ง่าย หรือเพื่อลดแรงเสียดทานและการยึดเกาะของผลิตภัณฑ์สุดท้าย ตัวอย่างสารหล่อลื่นภายนอกที่ใช้กับพอลิไวนิลคลอไรด์ ได้แก่ ไซพาราฟินส์ (Paraffin waxes) กรดสเตียริก และกรดมอนแทนนิคเอสเทอร์ (Montanic acid ester) กลีเซอรอล มอนอสเตียเรต หรือไขมันที่ผ่านการไฮโดรไลซ์แล้ว ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายใน สารป้องกันการลื่นไถล และสารเคลือบป้องกันการเกิดหมอก พบว่าประมาณ 0.25-1% ใช้ เอทิลีน บิสสเตียเรต ประมาณ 1% ใช้เป็นสารหล่อลื่นภายในและภายนอก เช่น แคทเซียมและซิงค์ สเตียเรต

พลาสติกไซเซอร์ (Plasticizers) เป็นสารที่ผสมในผลิตภัณฑ์พลาสติกเพื่อลดจุดหลอมเหลวของพลาสติกและทำให้เกิดการไหลตัวของพลาสติก ทำให้พลาสติกมีความยืดหยุ่นและอ่อนนุ่มขึ้น สะดวกต่อการดึง รีด ฉาบ และหล่อแบบ นอกจากนี้ยังช่วยรักษาความอ่อนนุ่มไม่ให้เสียไปโดยง่าย อีกทั้งยังมีสมบัติเป็นฉนวนไฟฟ้าทนต่อกรดต่าง น้ำมัน และผงซักฟอก โดยทั่วไปจะใส่ประมาณ 20-40% โดยน้ำหนัก พลาสติกไซเซอร์จึงมีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมผลิตภัณฑ์พลาสติกอย่างยิ่ง พลาสติกไซเซอร์ที่นิยมนำมาใช้ในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลมากที่สุดคือกลีเซอรอล (Glycerol) หรือกลีเซอริน (Glycerin) ซึ่งเป็นสารประกอบอินทรีย์ในกลุ่มของโพลีไฮดริคแอลกอฮอล์ (Polyhydric alcohols) ใช้เป็นสารตั้งต้นสำคัญในอุตสาหกรรมการผลิตสบู่ การผลิตยา การผลิตเครื่องสำอาง เป็นต้น [26] ที่อุณหภูมิห้องกลีเซอรอลเป็นของเหลวใส ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น มีรสหวานเล็กน้อย (ความหวานสัมพัทธ์ 60) ในโมเลกุลมีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) 3 หมู่ จึงละลายในน้ำได้ดี และมีสมบัติในการจับน้ำได้ดี (Hydroscopic) กลีเซอรอลเป็นส่วนประกอบหลักในโมเลกุลของไตรกลีเซอไรด์ (Triglyceride) ซึ่งได้จากการรวมตัวของกลีเซอรอลกับกรดไขมัน (Fatty acid) 3 โมเลกุล กลีเซอรอลใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหาร (Food additive) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นสารเก็บความชื้น (Humectant) ป้องกันไม่ให้อาหารแห้ง และเป็นอิมัลซิไฟเออร์ (Emulsifier) ช่วยให้อิมัลชันมีความคงตัว

อย่างไรก็ตามการใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไซเซอร์ยังมีข้อจำกัดคือ เมื่อนำเทอร์โมพลาสติกสตาบิล มาใช้งานในสภาวะที่มีความชื้นสูงเป็นระยะเวลานาน จะเกิดปรากฏการณ์คืบตัวของแข็งขึ้นเนื่องมาจากความแข็งแรงของพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลีเซอรอลกับโมเลกุลของแข็งนั้นไม่สูงมาก และยังต้านทานต่อความชื้นได้น้อย อย่างไรก็ตามการใช้กลีเซอรอลมีข้อดี เช่น ราคาไม่สูงมาก และยังมีความปลอดภัยสูงเมื่อเทียบกับพลาสติกไซเซอร์ชนิด

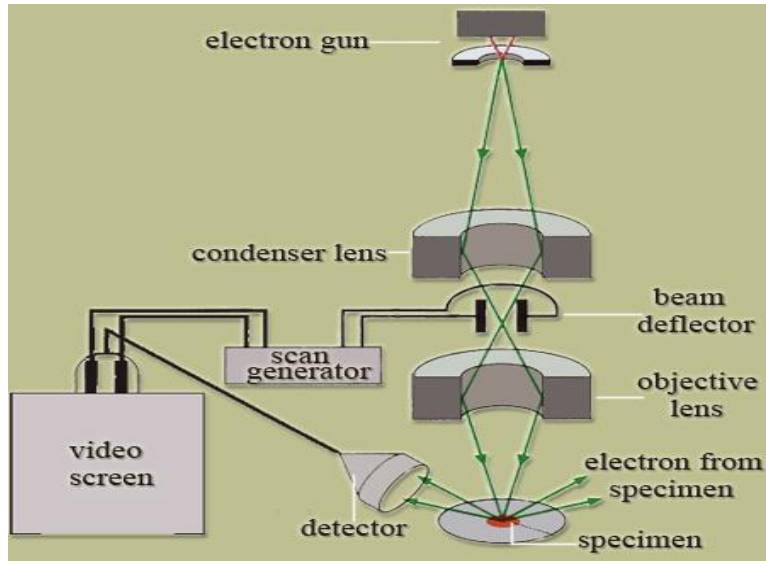
อื่นๆ ในกลุ่มพอลิออล (Polyols) นอกจากกลีเซอรอลแล้ว ยังมีการใช้พลาสติกไซเซอร์อื่น เช่น ไซลิลทอล (Xylitol) ซอร์บิทอล (Sorbitol) และมัลติทอล (Maltitol) เป็นต้น

เนื่องจากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ข้อจำกัดที่สำคัญคือการดูดซับความชื้นได้ง่ายและรวดเร็ว เนื่องจากในโครงสร้างมีหมู่ไฮดรอกซิลอยู่มาก จึงส่งผลให้สมบัติเชิงกลลดลงตามไปด้วย ดังนั้นจึงเป็นข้อจำกัดในการนำ เทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ไปใช้งานจริง อย่างไรก็ตาม การแก้ไขปัญหาการดูดซับน้ำที่มากเกินไปของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การปรับปรุงโครงสร้างของเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ให้มีความไม่ชอบน้ำ (Hydrophobicity) เพิ่มขึ้น หรือ การเติมพลาสติกไซเซอร์ที่มีสมบัติต้านทานต่อความชื้น หรือ การเคลือบผลิตภัณฑ์จากเทอร์โมพลาสติกสตาบิลไมซ์ด้วยสารบางอย่างที่มีความไม่ชอบน้ำ [27] เป็นต้น

2.6 เครื่องมือ

2.6.1. กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) [28] ประกอบด้วยแหล่งกำเนิดอิเล็กตรอนซึ่งทำหน้าที่ผลิตอิเล็กตรอนเพื่อป้อนให้กับระบบ (รูปที่ 2.7) โดยกลุ่มอิเล็กตรอนที่ได้จากแหล่งกำเนิดจะถูกเร่งด้วยสนามไฟฟ้า จากนั้นกลุ่มอิเล็กตรอนจะผ่านเลนส์รวบรวมรังสี (Condenser lens) เพื่อให้กลุ่มอิเล็กตรอนกลายเป็นลำอิเล็กตรอน ซึ่งสามารถปรับขนาดของลำอิเล็กตรอนใหญ่หรือเล็กได้ตามต้องการ หากต้องการภาพที่มีความคมชัดจะปรับให้ลำอิเล็กตรอนมีขนาดเล็ก หลังจากนั้นลำอิเล็กตรอนจะถูกปรับระยะโฟกัสโดยเลนส์ใกล้วัตถุ (Objective lens) ลงไปบนผิวชิ้นงานที่ต้องการศึกษา และกราดลงบนชิ้นงานในบริเวณที่ต้องการทดสอบ ทำให้เกิดอิเล็กตรอนทุติยภูมิ (Secondary electron) ขึ้น ซึ่งสัญญาณที่เกิดจากอิเล็กตรอนทุติยภูมินี้จะถูกบันทึก และแปลงไปเป็นสัญญาณทางอิเล็กทรอนิกส์ และนำไปสร้างเป็นภาพต่อไป



รูปที่ 2.11 ส่วนประกอบและการทำงานของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด [28]

2.6.2 เครื่องทดสอบแรงดึง

การทดสอบแรงดึง (Tensile test) เป็นการทดสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุ ที่บ่งบอกถึงการทนทานต่อแรงหรือพลังงานเชิงกลภายนอกที่มากกระทำได้นานน้อยเพียงใด วัสดุที่นำมาทดสอบถูกตัดเป็นชิ้นงานที่มีรูปร่างตามมาตรฐาน และนำไปทดสอบโดยเครื่องทดสอบแรงดึง ใช้แรงดึงสม่ำเสมอในหนึ่งทิศทาง (Uni-axial) จนกระทั่งชิ้นงานขาดออกจากกัน ระหว่างการทดสอบเครื่องจะวัดการยืดตัวของชิ้นงานอย่างต่อเนื่อง และสร้างกราฟมาตรฐานแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงดึงกับระยะยืดตัว ซึ่งสามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์แรงดึง (Tensile parameters) ได้แก่ แรงเค้น (Stress) ความเครียด (Strain) ค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด (Elongation at break) และค่ามอดูลัสของยัง (Young's modulus) [29]



รูปที่ 2.12 เครื่องทดสอบแรงดึง Testometric รุ่น Micro 350

2.6.3 เครื่องทดสอบการตกกระแทกของฟิล์ม (Dart Drop Impact Tester)

การทดสอบความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้ตุ้มน้ำหนักตกกระแทกเหมาะกับวัสดุ หรือชิ้นงานที่ขึ้นรูปแบบฟิล์ม ชีท หรือชิ้นงานที่ได้จากการขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์ในแม่พิมพ์แล้ว เช่น หมวกกันน็อค เป็นต้น โดยในการทดสอบสามารถทำได้สองลักษณะ คือ กำหนดให้ระดับความสูงของตุ้มน้ำหนักคงที่ แล้วเริ่มการทดสอบโดยการเพิ่มน้ำหนักขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นงานแตก หรือฉีกขาด หรือในอีกแนวทางหนึ่งจะทดสอบโดยใช้ตุ้มที่มีน้ำหนักคงที่ แล้วปรับระดับความสูงของตุ้มน้ำหนักให้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนกระทั่งชิ้นงานแตก หรือฉีกขาด ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบจะถูกนำมาคำนวณผลการทดสอบ [30] ดังสมการ

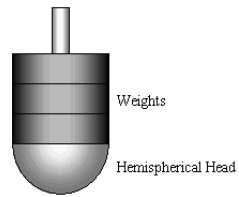
$$\text{Energy (J)} = hwf$$

เมื่อ h = ความสูง (mm) w = น้ำหนัก (Kg) และ f = ค่าที่ใช้แปลงหน่วยเป็น J (Nm)

เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตุ้มน้ำหนักและระดับความสูงของตุ้มน้ำหนักตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1709 แสดงในรูปที่ 2.13 และเครื่องมือทดสอบความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้ตุ้มน้ำหนักตกกระแทก แสดงในรูปที่ 2.14

Dart Drop Impact - ASTM D1709

The weight required to cause 50% of tested films to failure by impact from a falling dart under specified test conditions. Since impact values are not directly related to specimen thickness, data comparison can only be made between specimens whose thickness differs by up to 25%.



Dart

<https://plastics.ulprospector.com/properties/ASTMD1709>

Dart Drop Testing Methods

Method	Dart Head Diameter	Drop Height
A	38 mm (1.5 in)	0.66 m (26 in)
B	51 mm (2 in)	1.52 m (60 in)

รูปที่ 2.13 เส้นผ่านศูนย์กลางของหัวตุ้มน้ำหนัก และระดับความสูงของตุ้มน้ำหนักตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1709

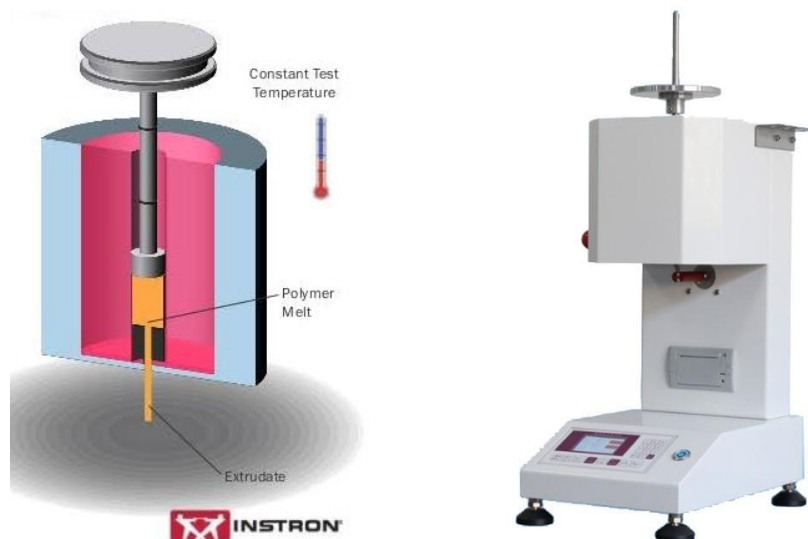
[31]



รูปที่ 2.14 เครื่องมือทดสอบความทนต่อแรงกระแทกโดยใช้ตุ้มน้ำหนักตกกระแทก [32]

2.6.4 เครื่องวัดดัชนีการไหล

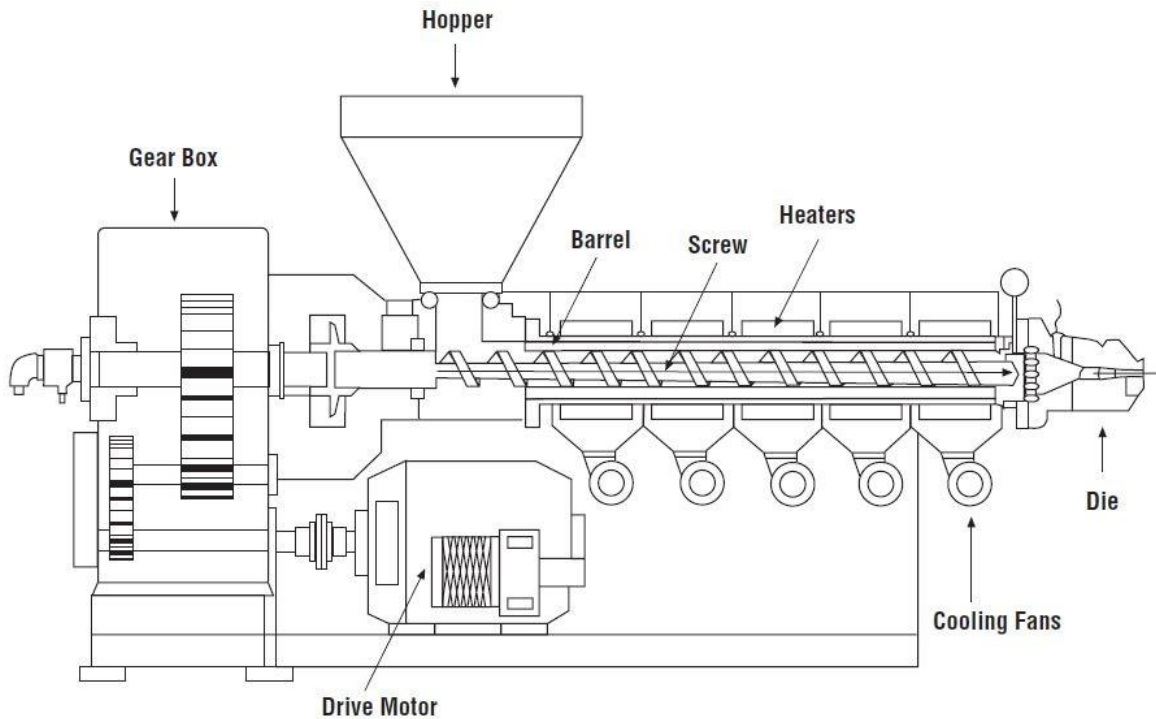
การทดสอบดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของเทอร์โมพลาสติกหลอม ตามมาตรฐาน DIN 53735 ASTM D 1238 และ ISO 1133 (MFR, Melt Flow Rate) โดยในการทดสอบนี้จะให้ความร้อนแก่พลาสติกในกระบอกทดสอบ (Cylinder) ด้วยอุณหภูมิที่กำหนด จนกระทั่งพลาสติกหลอมเป็นของเหลว จากนั้นใช้น้ำหนักกดตามค่าที่กำหนดในวิธีมาตรฐานเช่นกัน กดลงบนแท่งกด (Piston) เมื่อแท่งกดกระทำกับพลาสติกเหลวที่อยู่ในกระบอกทดสอบ พลาสติกเหลวก็จะไหลผ่านหัวตายน์ (Die) ออกมา จึงชั่งน้ำหนักพลาสติกที่ไหลออกมาเทียบกับเวลา 10 นาที คือค่า MFI ของพลาสติก ซึ่งมีหน่วยเป็น กรัม /10 นาที หลักการทดสอบ และเครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติกแสดงในรูปที่ 2.15



รูปที่ 2.15 หลักการทดสอบและเครื่องทดสอบดัชนีการไหลของพลาสติก [33-34]

2.6.5 เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่

เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin Screw Extruder) อาจเรียกชื่อได้หลายชื่อ เช่น เครื่องผสมแบบต่อเนื่อง (Continuous Mixer) เครื่องอัดรีดชนิดเกลียวหนอนคู่ หรือ เครื่องอัดรีดชนิดสกรูคู่ เป็นต้น ส่วนประกอบของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่แสดงในรูปที่ 2.16



รูป 2.16 ส่วนประกอบของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ [35]

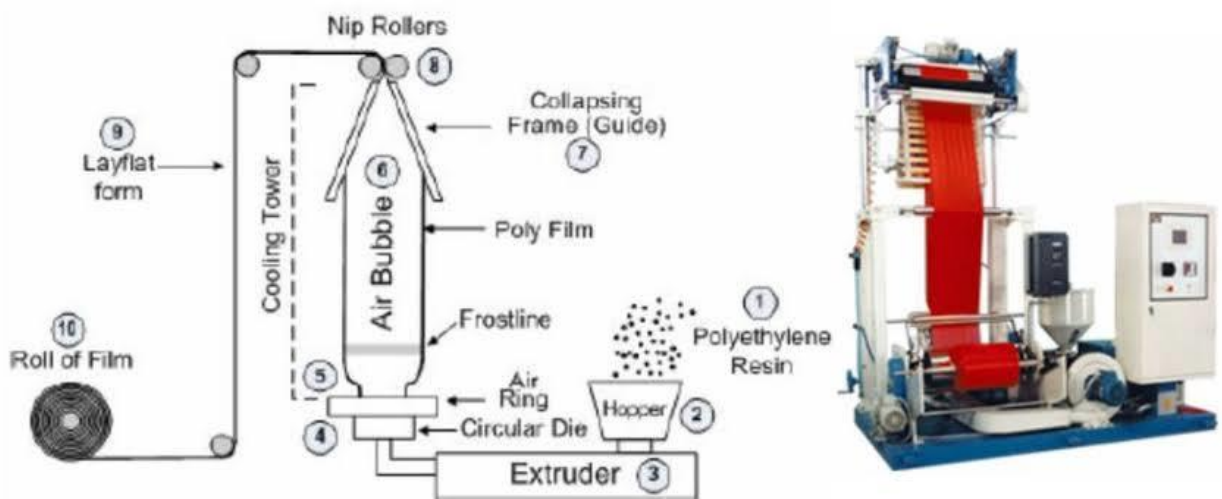
การทำงานของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ มีหลักการ คือ เม็ดพลาสติกและส่วนผสมต่างๆ ที่ผสมกันดีแล้วในสถานะแห้ง (Dry mix) จะถูกป้อนผ่านกรวยป้อนวัตถุดิบ (Hopper) และเข้าสู่ห้องควบคุมอุณหภูมิหรือกระบอก หรือบาร์เรล (Barrel) ซึ่งมีเกลียวหนอนหรือสกรูหมุนอยู่ การหมุนของเกลียวหนอนจะพาให้พลาสติกเคลื่อนที่ไปด้านหน้าตามแนวสกรู จนกระทั่งเข้าสู่ช่วงต่างๆ ในบาร์เรล จนการอัดและเกิดการผสม การเดินทางของพลาสติกผ่านบาร์เรล แบ่งเป็น 3 ช่วง ได้แก่ ช่วงนำพลาสติกเข้า (Feed zone) ช่วงนี้พลาสติกจะได้รับความร้อนและความดันไม่มาก แต่เม็ดพลาสติกจะเคลื่อนที่ใกล้กันมากขึ้น ช่วงการอัดพลาสติก (Compression zone) ช่วงนี้พลาสติกจะได้รับแรงอัดและแรงเฉือนร่วมกับการกักความร้อนจนพลาสติกเริ่มหลอม แรงอัดที่ได้รับจะช่วยไล่อากาศและสารระเหยอื่นๆ ออกไปจากระบบ และช่วงสุดท้ายคือ ช่วงการหลอมพลาสติก (Metering zone) ที่บริเวณนี้พลาสติกจะได้รับความร้อนและแรงเฉือนร่วมกับการกักความร้อนจนพลาสติกหลอมเป็นของเหลวทั้งหมด และเป็นช่วงที่พลาสติกหลอมได้รับความดัน และแรงเฉือนสูงที่สุด ปล่อยให้ไหลออกมาทางหัวไดน์ (Die)

เครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ เหมาะกับงานอัดรีดที่ต้องการการผสมที่ดี ต้องการปริมาณการผลิตสูง การหมุนของสกรูในเครื่องอัดรีดแบบสกรูคู่จะมี 2 แบบ คือ หมุนในทิศทางเดียวกัน (Co-rotating) ซึ่งวัสดุที่ผสมจะได้รับความร้อนสม่ำเสมอ เนื่องจากวัสดุสัมผัสกับผนังบาร์เรลได้มาก การหลอมเหลวและการผสมมีประสิทธิภาพสูง

และหมุนสวนทางกัน (Counter rotating) ซึ่งสกรูแต่ละตัวจะพาวัสดุมากองรวมกันบริเวณระหว่างสกรู และเคลื่อนที่ผ่านระหว่างสกรูไปตลอดแนวยาวของสกรู โดยระหว่างสกรูเป็นบริเวณที่มีแรงเฉือนสูงกว่าบริเวณอื่นซึ่งมีแรงเฉือนต่ำความมาก ทำให้แรงเฉือนโดยรวมน้อยกว่าแบบหมุนในทิศทางเดียวกัน อย่างไรก็ตามการหมุนสวนทางกันทำให้เกิดการอัดและบังคับให้พอลิเมอร์หลอมเคลื่อนที่ไปข้างหน้าได้ดีกว่า

2.6.7 เครื่องเป่าฟิล์ม

การเป่าฟิล์ม (Blown-film extrusion) ทำโดยการอัดพลาสติกหลอมจากเครื่องอัดรีด (Extruder) ผ่านไดโนวงแหวน (รูปที่ 2.17) แล้วใช้ลมเป่าให้วงของพลาสติกหลอมขยายตัวมากกว่าไดโนวงแหวนหลายเท่า พร้อมทั้งเย็นตัวลง วงฟิล์มพลาสติกที่เย็นแล้วจะถูกรวบผ่านลูกกลิ้ง แล้วม้วนเก็บ ก่อนนำไปตัดหรือเชื่อมเป็นถุง ให้มีขนาดความยาวตามต้องการ



รูปที่ 2.17 กระบวนการเป่าฟิล์มและเครื่องเป่าฟิล์ม [36]

กระบวนการเป่าฟิล์มใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตถุงพลาสติกจากพอลิเอทิลีน เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตสินค้าทั้งแบบหลอดและแผ่นในเวลาเดียวกัน การควบคุมความกว้างและความหนาของฟิล์มทำได้โดยการปรับความเร็วลมในการเป่า และความเร็วของเครื่องอัดรีด การควบคุมอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดฟิล์มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไดโนวงแหวน (Blow up ratio) โดยทั่วไปอยู่ในช่วง 2:1 ถึง 3:1 [37]

2.7 การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

ดังที่กล่าวมาแล้วว่าการเป่าฟิล์มเป็นเทคโนโลยีในการผลิตฟิล์มพลาสติกที่ใช้กันทั่วไป และมีความสำคัญที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมฟิล์มบรรจุภัณฑ์ [38] กระบวนการเป่าฟิล์ม [39] เริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกมาหลอมที่อุณหภูมิเหมาะสมอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืด ซึ่งจะถูกดันให้ไหลผ่านไดน์วงแหวน จากนั้นเป่าลมเข้าทางศูนย์กลางไดน์วงแหวน แรงดันลมจะทำให้พลาสติกเหลวพองออกลักษณะเป็นลูกโป่งฟิล์ม ผู้ควบคุมต้องทำการควบคุมแรงดันลมคงที่โดยการควบคุมให้ปริมาณลมเข้าเท่ากับปริมาณลมออก เพื่อให้ฟิล์มมีความหนาสม่ำเสมอ เมื่อได้ความหนาที่ต้องการโป่งฟิล์มจะถูกดึงออกจากไดน์วงแหวน อย่างต่อเนื่องและเย็นตัวลงโดยการเป่าลมจากภายนอก และหากต้องการให้ด้านในโป่งฟิล์มเย็นลงก็สามารถทำได้โดยใช้ระบบทำความเย็นภายในแบบฟองอากาศ (Internal bubble cooling) หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้ว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบเป็นแผ่นให้ตึงและส่งเก็บเข้าม้วน และอาจมีการติดตั้งอุปกรณ์เสริมเช่น เครื่องระเบิดผิวฟิล์ม เครื่องตัดประจุไฟฟ้าหรือเครื่องตัดฟิล์มเพื่อแยกเป็นแผ่น เป็นต้น

ในการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมา คณะผู้วิจัยพบว่ายังไม่มีนักวิจัยกลุ่มใดประสบความสำเร็จในการขึ้นรูปฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม สืบเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย (270 °C) [40] จึงมีนักวิจัยหลายกลุ่มพยายามลดอุณหภูมิหลอมเหลวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยการเติมพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล หรือใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสารตัวเติมเพื่อปรับสมบัติของฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพ (Bio-based plastics)

Hu และคณะ [40] เตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/โคโตซาน สำหรับใช้เป็นสารเคลือบเพื่อยืดอายุการเก็บรักษากล้วยสุก ผลการศึกษาพบว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสช่วยเพิ่มความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ความทนต่อความร้อน (Thermostability) ความต้านทานน้ำ (Water resistance) และการซึมผ่านของออกซิเจน (Oxygen permeability) แต่ทำให้ค่าการส่องผ่านแสง (Light transmittance) และค่าความต้านทานต่อเชื้อแบคทีเรียทั้งแกรมบวกและแกรมลบแย่ง (Antibacterial activity against Gram-positive (*Staphylococcus aureus*) and Gram-negative (*Escherichia coli*) bacteria) และสามารถยืดอายุการเก็บรักษากล้วยสุกได้จริง

Li และคณะ [41] เตรียมฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/พอลิเอนิลีน และใช้กลีเซอรอลเป็นพลาสติกไฮเวอร เพื่อใช้งานด้านระบบควบคุมการปลดปล่อยยาที่กระตุ้นด้วยไฟฟ้า และเซนเซอร์ ด้วยวิธีหล่อฟิล์มจากสารละลายและอบแห้งด้วยวิธีการอบแห้งแบบเยือกแข็งภายใต้สภาพสุญญากาศ (Freeze drying) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าเมื่อเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น จลนศาสตร์การบวมตัวของฟิล์มดังกล่าวไม่เปลี่ยนแปลง แต่ค่าการบวมตัวมีค่าสูง ส่วนค่าความแข็งแรงกด และมอดุลัสแรงกด (Compressive fracture stress and modulus) มีค่าเพิ่มขึ้น ส่วนค่าการนำไฟฟ้าของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเพิ่มปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและสารเชื่อมโยง

Yang และ Zhu [42] ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อความหนืดของสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และพบว่า เมื่อเวลาที่ใช้ในการกวนสารละลายเพิ่มขึ้น ความหนืดของสารละลายจะลดลง เมื่อเพิ่มอุณหภูมิ ความหนืดของสารละลายจะลดลงเช่นกัน และเมื่อความเข้มข้นของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ความหนืดจะเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าอัตราส่วนผสมของสารละลาย น้ำ:กลีเซอรอล มีผลต่อการละลาย กล่าวคือเมื่อกลีเซอรอลมีอัตราส่วนตั้งแต่ 70% ขึ้นไปพบว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะไม่ละลายในสารละลาย และในขั้นตอนการกวนสารละลาย หากมีผงของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสบางส่วนที่ยังไม่ละลายให้ทำการกวนต่อไปเรื่อยๆ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะค่อยๆ ละลายจนหมด

Tavaresa และคณะ [43] ได้ทำการทดลองเตรียมฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพจากแป้งมันสำปะหลังและแป้งข้าวโพดร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (อัตราส่วนแป้ง:คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เท่ากับ 50:50) ด้วยวิธีหล่อฟิล์มจากสารละลาย และใช้กลีเซอรอล (ร้อยละ 30) เป็นพลาสติกไฮเซอร พบว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสช่วยให้ค่าความแข็งแรงดึง (Tensile strength) ของฟิล์มเพิ่มขึ้น 206% เมื่อผสมแป้งข้าวโพด และเพิ่มขึ้น 51% เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ความเครียด ณ จุดขาด เพิ่มขึ้น 89% เมื่อผสมแป้งข้าวโพด และเพิ่มขึ้น 74% เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ส่วนค่าระยะยืด ณ จุดขาดเพิ่มขึ้น 381% เมื่อผสมแป้งข้าวโพด และเพิ่มขึ้น 57% เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้ยังพบว่าค่ามอดุลัส เพิ่มขึ้น 20% เมื่อผสมแป้งข้าวโพด และเพิ่มขึ้น 18% เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลัง และค่าความต้านทานต่อน้ำของฟิล์ม เพิ่มขึ้น 48% เมื่อผสมแป้งข้าวโพด และเพิ่มขึ้น 40% เมื่อผสมกับแป้งมันสำปะหลัง ซึ่งเกิดจากอันตรกิริยาระหว่างหมู่ -OH ในโครงสร้างแป้งและกลีเซอรอล กับหมู่ -COOH ในโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

Ghanbarzadeha และคณะ [44] ศึกษาผลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (0, 5, 10, 15 และ 20%W/W เทียบกับน้ำหนักแป้ง) ต่อสมบัติเชิงกลของฟิล์มที่เตรียมจากแป้งข้าวโพดและ ที่มีการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลด้วยกรดซิตริก (10%w/w เทียบกับน้ำหนักแป้ง) ด้วยวิธีหล่อฟิล์มจากสารละลาย และใช้กลีเซอรอล (ร้อยละ 40) เป็นพลาสติกไซเซอร์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าการเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสช่วยปรับปรุงสมบัติการต้านทานน้ำของฟิล์ม และค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุด (Ultimate tensile strength) ของฟิล์มให้เพิ่มขึ้นได้ และเมื่อใช้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสร้อยละ 15 โดยน้ำหนัก ค่าการต้านทานน้ำของฟิล์ม ค่าการดูดซับความชื้น และการละลายของฟิล์มแป้งลดลง นอกจากนี้การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมากถึงร้อยละ 20 มีผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดเพิ่มขึ้น โดยไม่ทำให้ค่าระยะยืด ณ จุดขาดของฟิล์มลดลง และการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้ง ทำให้การเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีผลต่อการปรับปรุงสมบัติของแป้งลดลงเนื่องจากอันตรกิริยาระหว่างโมเลกุลของแป้งกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลดลง

Dang และ Yoksan [45] ได้พัฒนาฟิล์มแป้งที่มีไคโตซานเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ (0.37-1.45%). ด้วยเทคนิคการเป่าขึ้นรูป พบว่าไคโตซานมีความเข้ากันได้กับเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์เป็นอย่างดีโดยการเกิดพันธะไฮโดรเจน และการเติมไคโตซานมีผลให้ความสามารถในการดึงยึดของ และความสามารถในการไหลขณะหลอมลดลง รวมทั้งฟิล์มเหลืองและขุ่นขึ้น แต่ข้อดีของการเติมไคโตซานคือความสามารถในการผสมของวัสดุดีขึ้น ฟิล์มมีความแข็ง ความแข็งแรง ความเสถียรต่อความร้อน การดูดกลืนแสงยูวี ได้ดีขึ้น ในขณะที่การดูดซับน้ำ และการเกาะติดพื้นผิว (Surface sticky) ลดลง ดังนั้นฟิล์มแป้งที่มีส่วนผสมของไคโตซานจึงเหมาะที่จะนำมาใช้งานเป็นฟิล์มรับประทานได้ในอุตสาหกรรมอาหาร

Garcia และคณะ [46] ทำการปรับปรุงฟิล์มผสมระหว่างแป้งและพอลิเอสเทอร์ที่ขึ้นรูปโดยเทคนิคการเป่าฟิล์ม โดยใช้กรดซิตริกเป็นสารช่วยประสาน (Compatibilizer) และกลีเซอรอลเป็นสารเพิ่มความยืดหยุ่น และศึกษาอิทธิพลของการเติมโซเดียมไฮโปฟอสเฟต (Sodium hypophosphite (SHP) พบว่าสมบัติบางอย่างของฟิล์มดีขึ้นตามอย่างแย่ง กล่าวคือ ความทนต่อแรงดึงของฟิล์มที่ผสมกรดซิตริกอย่างเดียว และกรดซิตริกผสมโซเดียมไฮโปฟอสเฟตเพิ่มขึ้น 47.1% และ 104.3% ตามลำดับ เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผสมกรดซิตริก และโซเดียมไฮโปฟอสเฟต และค่าระยะยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มที่ผสมกรดซิตริกผสมโซเดียมไฮโปฟอสเฟตเพิ่มขึ้น 125.7% เมื่อเทียบกับฟิล์มที่ไม่ผสมกรดซิตริก และโซเดียมไฮโปฟอสเฟต อย่างไรก็ตาม กลับพบว่าค่าความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำของฟิล์มที่ผสมกรดซิตริกอย่างเดียว และกรดซิตริกผสมโซเดียมไฮโป

พอสเฟดลดลงอย่างเห็นได้ชัด เนื่องจากฟิล์มมีความเข้ากันได้มากขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าฟิล์มที่เติมทั้งกรดซิตริก และโซเดียมไฮโปฟอสเฟตมีเสถียรภาพต่อความร้อนเพิ่มขึ้นอีกด้วย

Khanoonkon [47] และคณะศึกษาผลของการเติมสารประสาน Stearic acid-grafted starch (ST-SA) ต่อสมบัติของฟิล์มผสม Linear low density polyethylene/thermoplastic starch (LLDPE/TPS) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่าฟิล์ม โดยใช้ความเข้มข้นของ ST-SA 1–5% และ อัตราส่วน LLDPE:TPS เท่ากับ 60:40 พบว่า การเติม ST-SA ช่วยให้การขึ้นรูปของผสม LLDPE/TPS ทำได้ง่ายขึ้น และความสามารถในการไหลในขณะหลอมของของผสมดีขึ้น เนื่องจาก ST-SA ช่วยให้ LLDPE และ TPS มีแรงยึดเกาะระหว่างผิวหน้าเพิ่มขึ้น โดยความเข้มข้นที่เหมาะสมที่สุดของ ST-SA คือ 1%

Khanoonkon และคณะ [48] ศึกษาผลของ Stearic acid-grafted starch (ST-SA) ต่อสมบัติการไหล สมบัติทางความร้อน สมบัติทางแสง สมบัติเชิงกล และความสามารถในการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจน ของฟิล์มผสม Linear low density polyethylene/thermoplastic starch (LLDPE/TPS, 60/40) ที่ขึ้นรูปด้วยกระบวนการเป่า ผลการศึกษาพบว่า การเติม ST-SA (1, 3, 5%) ช่วยลดการเกิดปรากฏการณ์ Shear thinning ลดความเป็นอีลาสติกที่อุณหภูมิห้อง (Ambient temperature elasticity) และช่วยเพิ่มความทนต่อแรงดึง ซีแคนท์มอดุลัส (Secant modulus) ความสามารถในการดึงยืด และการดูดกลืนรังสียูวี นอกจากนี้ยังช่วยให้อัตราการซึมผ่านของไอน้ำและออกซิเจนของฟิล์มผสมลดลงด้วย

ดังนั้น ในโครงการวิจัยนี้จะทดลองขึ้นรูปฟิล์มฐานชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบด้วยเทคนิคการเป่าฟิล์ม ทำการผสมสารพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอลเพื่อลดอุณหภูมิหลอมเหลวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส หาปริมาณของกลีเซอรอลที่เหมาะสม รวมทั้งสารเติมแต่งอื่นที่ช่วยในการขึ้นรูป และสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น อุณหภูมิในแต่ละโซน ความหนืดของพอลิเมอร์หลอม ความเร็วรอบของสกรู แรงดันลม ความหนาของฟิล์ม การทำให้เย็น เป็นต้น จากนั้นทดสอบสมบัติของฟิล์ม เช่น สมบัติทางกายภาพ สมบัติทางความร้อน สมบัติเชิงกล สันฐานวิทยา เป็นต้น

บทที่ 3

การทดลอง

3.1 สารเคมี เครื่องมือ และอุปกรณ์

3.1.1 สารเคมี

1. กลีเซอรอล (Glycerol) ความบริสุทธิ์ 99.5 % AR grade บริษัท QRèC
2. คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เกรดอาหาร บริษัท เคมีภัณฑ์ จำกัด
3. พอลิ(บิวทิลีนอะดิเพตโคเทเรพทาเรท) Poly(butylene adipate-co-terephthalate) (PBAT) หรือ Ecoflex[®] บริษัท BASF
4. พอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำ LLDPE บริษัท PTT Global Chemicals Co. Ltd.
5. แป้งมันสำปะหลัง
6. สารเติมแต่ง เช่น สารเพิ่มความเหนียว สารช่วยการกระจายตัว สารช่วยการยึดเกาะ สารเติมแต่งเพื่อช่วยในการขึ้นรูป (Processing aid additives) เช่น สารหล่อลื่นภายในและภายนอก

3.1.2 เครื่องมือและอุปกรณ์

- 3.1.2.1 เครื่องชั่ง (ทศนิยม 2 และ 4 ตำแหน่ง) บริษัทไซแอนทิฟิกโพรโมชัน จำกัด
- 3.1.2.2 ตู้อบลมร้อน (Hot air oven) รุ่น FED 240 บริษัท BINDER
- 3.1.2.3 เครื่องกวนสาร และให้ความร้อน (Hotphate stirrer) รุ่น MR 3001 บริษัท Heidolph
- 3.1.2.4 เครื่องปั่นน้ำผลไม้ รุ่น EM-11 บริษัท SHARP
- 3.1.2.5 เวอร์เนียคาลิเปอร์ระบบดิจิตอล (Digital Vernier caliper) ทศนิยม 2 ตำแหน่ง
- 3.1.2.6 กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; SEM) บริษัท LEO รุ่น 1450 VP
- 3.1.2.6 ตู้อบสุญญากาศ (Vacuum oven) บริษัท Fisher scientific รุ่น Model 282A
- 3.1.2.7 เครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี (Fourier transform infrared spectroscopy; FT-IR) บริษัท Perkin Elmer รุ่น System 2000
- 3.1.2.8 เครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ (Universal tensile tester) บริษัท Testometric รุ่น Micro 350
- 3.1.2.9 เครื่องผสมแบบเกลียวทวินคู (Twin-screw extruder)
- 3.1.2.10 เครื่องเป่าฟิล์ม (Blown film extruder)

3.2 การคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ

เริ่มจากการผสมองค์ประกอบทั้งหมดในสถานะแห้ง (Dry mix) ปริมาณรวม 5 กิโลกรัม (แสดงในตารางที่ 3.1–3.3) ผสมกันในเครื่องผสม (Mixer) เมื่อของผสมเข้ากันดี จะนำของผสมทั้งหมดลงสู่กรวยเติมสาร (Hopper) ของเครื่องผสมแบบเกลียวหนอนคู่ เพื่อให้ของผสมผ่านเข้าไปในกระบอกลบ (Barel) โดยกำหนดสภาวะที่ใช้ในการผสมดังตารางที่ 3.4–3.5 หลังจากผสมกันดีแล้ว พลาสติกคอมพาวด์ในสถานะหลอมจะออกมาจากเครื่องผสมที่ตำแหน่งหัวไดน์ (Die) หล่อเย็นด้วยน้ำที่อุณหภูมิ 30°C แล้วตัดเป็นเม็ดขนาดประมาณ 2–3 มม. สุดท้ายนำเม็ดพลาสติกที่ได้จากการคอมพาวด์ไปอบเพื่อกำจัดความชื้นที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ก่อนนำไปขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มต่อไป

หมายเหตุ สำหรับแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จะนำไปผสมกับกลีเซอรอลก่อนและเก็บในภาชนะอับอากาศที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำมาผสมกับส่วนประกอบอื่น

ตารางที่ 3.1 อัตราส่วนของการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส แป้งมันสำปะหลัง กลีเซอรอล และน้ำ

ส่วนประกอบ	CMC (%)	Starch (%)	Glycerol (%)	Water (%)
ชื่อสูตร				
CMC-Plas	70.0	0	27.0	3.0
CMC,Starch-Plas	35.0	35.0	27.0	3.0
CMC1-1	33.3	0	33.3	33.3
CMC 1-1 TPS	16.7	16.7	33.3	33.3
CMC 1%-TPS	1.0	69.0	27.0	3.0
CMC 2%-TPS	2.0	68.0	27.0	3.0
CMC 3%-TPS	3.0	67.0	27.0	3.0
CMC 4%-TPS	4.0	66.0	27.0	3.0

ตารางที่ 3.2 สูตรคอมพาวด์ของการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE

ชื่อสูตร	PBAT- CMC- Plas	PBAT- CMC,Starch- Plas	LLDPE- CMC-Plas	LLDPE- CMC,Starch- Plas	LLDPE- CMC 1-1	LLDPE- CMC 1-1 TPS
ส่วนประกอบ (%)						
CMC-Plas	30.0	0	30.0	0	0	0
CMC,Starch-Plas	0	30.0	0	30.0	0	0
CMC 1-1	0	0	0	0	30.0	0
CMC 1-1 TPS	0	0	0	0	0	30.0
Ecoflex®	68.0	68.0	0	0	0	0
LLDPE	0	0	43.0	56.0	56.0	56.0
FB*	0	0	19.00	6.0	6.0	6.0
Lo*	0	0	5.0	5.0	5.0	5.0
El*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
Zn100*	0	0	1.0	1.0	1.0	1.0
SMA*	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
รวม	100	100	100	100	100	100

*สารเติมแต่งที่ช่วยในกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดได้

ตารางที่ 3.3 สูตรคอมพาวด์ของการผสมเทอร์โมพลาสติกสตาบิลกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

ชื่อสูตร	LLDPE-CMC1%-TPS	LLDPE-CMC2%-TPS	LLDPE-CMC3%-TPS	LLDPE-CMC4%-TPS
ส่วนประกอบ (%)				
CMC1%-TPS	30.0	0	0	0
CMC2%-TPS	0	30.0	0	0
CMC3%-TPS	0	0	30.0	0
CMC4%-TPS	0	0	0	30.0
LLDPE	62.0	62.0	62.0	62.0
Lo*	5.0	5.0	5.0	5.0
El*	1.0	1.0	1.0	1.0
Zn100*	1.0	1.0	1.0	1.0
SMA*	1.0	1.0	1.0	1.0
รวม	100	100	100	100

*สารเติมแต่งที่ช่วยในกระบวนการขึ้นรูปที่ไม่สามารถเปิดเผยรายละเอียดได้

ตารางที่ 3.4 สภาวะที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติก สตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE

ชื่อสูตร	PBAT- CMC- Plas	PBAT- CMC,Starch- Plas	LLDPE- CMC-Plas	LLDPE- CMC,Starch- Plas	LLDPE- CMC 1-1	LLDPE- CMC 1-1 TPS
Extruder temperature (°C)						
Die	160	160	180	170	170	170
Zone 1	160	160	180	170	170	170
Zone 2	160	160	180	170	170	170
Zone 3	160	160	180	165	165	165
Zone 4	155	155	175	165	165	165
Zone 5	140	140	175	150	150	150
Zone 6	130	130	175	140	140	140
Zone 7	120	120	165	130	130	130
Zone 8	100	100	140	110	110	110
Zone 9	90	90	90	90	90	90
Main screw speed (rpm)	200	200	160	200	250	250
Melt pressure (Bar)	55	55	58	58	50	50
Pelletize speed (rpm)	900	900	900	900	900	900
Water temperature (°C)	35	35	35	35	35	35
Gala Temperature (°C)	190	190	190	190	180	180
Melt flow index at 190 °C (g/10 min)	8.0340	6.9700	1.9865	1.7480	-	-
Density (g/mL)	1.2596	1.2136	0.8115	0.8830	-	-

ตารางที่ 3.5 สภาวะที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

ชื่อสูตร	LLDPE-CMC1%- TPS	LLDPE-CMC2 %- TPS	LLDPE-CMC3 %- TPS	LLDPE-CMC4 %- TPS
Extruder temperature (°C)				
Die	180	180	180	180
Zone 1	180	180	180	180
Zone 2	180	180	180	180
Zone 3	185	185	185	185
Zone 4	180	180	180	180
Zone 5	175	175	175	175
Zone 6	160	160	160	160
Zone 7	130	130	130	130
Zone 8	125	125	125	125
Zone 9	80	80	80	80
Main screw speed (rpm)	400	400	400	400
Melt pressure (Bar)	42	63	42	63
Pelletize speed (rpm)	1600	1600	1600	1600
Water temperature (°C)	30	30	30	30
Gala Temperature (°C)	190	190	190	190

3.3 การเป่าฟิล์ม

มีขั้นตอนดังนี้ เริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกมาหลอมที่อุณหภูมิเหมาะสมอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืด ซึ่งจะถูกดันให้ไหลผ่านไดน์วงแหวน จากนั้นเป่าลมเข้าทางศูนย์กลางไดน์วงแหวน แรงดันลมจะทำให้พลาสติกเหลวพองออกลักษณะเป็นลูกโป่งฟิล์ม ซึ่งจะถูกดึงออกจากไดน์วงแหวนอย่างต่อเนื่อง และเย็นตัวลงโดยการเป่าลมจากภายนอก หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้ว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบเป็นแผ่นให้ตั้งและส่งเก็บเข้าม้วน สภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพแต่ละสูตร แสดงในตารางที่ 3.6–3.7

ตารางที่ 3.6 สภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE

ชื่อสูตร	PBAT-CMC-Plas	PBAT-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC-Plas	LLDPE-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC 1-1	LLDPE-CMC 1-1 TPS
Temperature (°C)						
Die Heater	150	140	160	160	180	180
Heater 4	155	140	150	158	175	175
Heater 3	160	140	155	155	170	170
Heater 2	155	140	153	153	165	165
Heater 1	130	130	140	150	150	150
Screw speed (rpm)	69.9	82.5	63.2	126.2	52	50
Film thickness (mm)	0.512–0.514	0.145–.220	0.184–0.280		0.122–0.185	0.090–0.116
หมายเหตุ	เป่าฟิล์มไม่ได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้

ตารางที่ 3.7 สภาวะที่ใช้ในการเป่าฟิล์มเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

ชื่อสูตร	LLDPE-CMC1%-TPS	LLDPE-CMC2 %-TPS	LLDPE-CMC3 %-TPS	LLDPE-CMC4 %-TPS
Temperature (°C)				
Die Heater	155	160	180	180
Heater 4	150	158	175	175
Heater 3	140	155	170	170
Heater 2	120	153	165	165
Heater 1	100	150	150	150
Screw speed (rpm)	4.06	4.28	3.99	3.97
Film thickness (mm)	0.020–0.026	0.020–0.026	0.023–0.026	0.023–0.027
หมายเหตุ	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้

3.4 การศึกษาสมบัติของฟิล์ม

3.5.1 สมบัติทางกายภาพ

การวัดดัชนีการไหล (Melt flow index, MFI) ของเม็ดคอมปาวด์ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM 1238 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 190°C ต้มน้ำหนัก 2.16 Kg รายงานผลในหน่วย g/10 min

การวัดความหนาแน่นของเม็ดคอมปาวด์ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D792 ใช้น้ำหนักเม็ดคอมปาวด์ประมาณ 0.5 กรัม และชั่งน้ำหนักในอากาศ น้ำ และไอโซโพรพานอล

การวัดความหนาของฟิล์มวัดโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ระบบดิจิทัล โดยวัดทั้งหมด 5 จุด ภายในฟิล์มที่มีพื้นที่หน้าตัด $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$

3.5.2 สมบัติเชิงกล

ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสของยัง ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D882-80a (Tensile testing of thin plastic sheeting (film)) โดยตัดแผ่นฟิล์มตัวอย่าง ให้ได้ขนาด $2.0\text{ cm} \times 25.0\text{ cm}$ และเก็บในสภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $70 \pm 5\%$ ก่อนนำไปทดสอบความทนต่อแรงดึงยืด อัตราความเร็วในการดึง 30 มิลลิเมตรต่อนาที วัดแรง 500 นิวตัน กำหนดความยาวพิคัก 100 และ 50 มิลลิเมตร สำหรับการทดสอบในทิศทางตามแนวเครื่องจักร (Machine direction, MD) และทิศตามขวางเครื่องจักร (Transverses machine direction, TD) ตามลำดับ

ความต้านทานต่อการตกกระแทก (Drop dart impact) ของฟิล์มทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1709. โดยตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด $22.0\text{ cm} \times 22.0\text{ cm}$ ล้วนทำไปวางไว้บนที่วางตัวอย่างและล๊อคให้ตึง กำหนดความระยะห่างระหว่างหัวลูกตุ้มน้ำหนักถึงผิวหน้าตัวอย่าง (ความสูงของลูกตุ้ม) เท่ากับ 66 cm แล้วปล่อยลูกตุ้มที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 20-390 g (ค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักลูกตุ้มขึ้นเรื่อยๆ) ให้ลูกตุ้มตกกระแทกกับฟิล์มที่ขึงไว้ อ่านค่าน้ำหนักลูกตุ้มที่กระแทกแล้วทำให้ฟิล์มขาด

3.5.3 สัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตัวอย่าง ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) รุ่น 1450VP บริษัท LEO ความต่างศักย์เร่งเท่ากับ 10 กิโลโวลต์ ถ่ายภาพพื้นผิวของฟิล์มที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า โดยเตรียมตัวอย่างฟิล์มให้มีขนาดเหมาะสม และเคลือบด้วยทองคำ ก่อนทำการวิเคราะห์

บทที่ 4

ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 การเตรียมเทอร์โมพลาสติกจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแป้งมันสำปะหลัง

การทดลองขึ้นรูปฟิล์มชีวภาพจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลาย ในระดับห้องปฏิบัติการ ได้ฟิล์มที่มีความใส โปร่งแสง ดังแสดงในรูปที่ 4.1 อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ไม่มีการเติมพลาสติกไซเซอร์มีความยืดหยุ่นน้อย เปราะและแตกง่าย เนื่องจากการสร้างพันธะไฮโดรเจนระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยตัวเอง [49] และเมื่อเทียบกับฟิล์มบรรจุภัณฑ์ชนิด PP และ PE พบว่าฟิล์มที่เตรียมได้ยังไม่เหมาะที่จะนำมาใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ จึงควรมีการปรับปรุงโดยการเติมกลีเซอรอลพลาสติกไซเซอร์



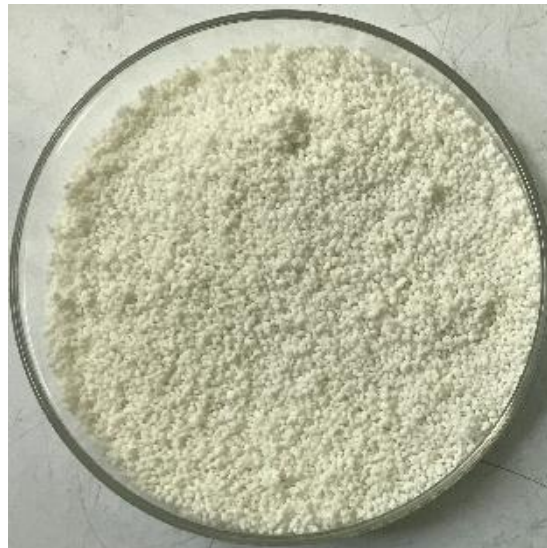
รูปที่ 4.1 ฟิล์มชีวภาพจากคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เตรียมโดยใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยตัวทำละลายในระดับห้องปฏิบัติการ

ในการหาอัตราส่วนที่เหมาะสมของกลีเซอรอลพลาสติกไซเซอร์กับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เหมาะสมที่สุดที่สามารถขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มได้นั้น คณะวิจัยได้ทดลองใช้อัตราส่วนคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ เท่ากับ 70/27/30 ซึ่งเป็นสูตรที่ใช้กันทั่วไปในการเตรียมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชที่ใช้ทำเป็นฟิล์มบรรจุภัณฑ์

ในการทดลองผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ เท่ากับ 70/27/3 พบว่า คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสมีสมบัติชอบน้ำและสามารถละลายน้ำได้ จึงดูดกลีเซอรอลไว้ทำให้ของผสมมีลักษณะเป็นก้อน และเมื่อนำไปปั่นเหวี่ยงโดยเครื่องผสม (Mixer) ก็ไม่สามารถลดขนาดก้อนลงได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยการนำแป้งมัน

สำปะหลังผสมเข้ากับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในอัตราส่วน 50/50 ก่อนที่จะนำไปผสมกับกลีเซอรอล พบว่ากลีเซอรอล คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และแป้งมันสำปะหลัง สามารถปั่นเข้ากันได้ดีกว่าการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับกลีเซอรอล ดังรูปที่ 4. 2 ซึ่งในกรณีนี้อัตราส่วนของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แป้ง/กลีเซอรอล/น้ำ เท่ากับ 35/35/27/3 และหลังจากผสม ส่วนผสมจะถูกเก็บในภาชนะปิดที่ไม่มีอากาศผ่านเข้าออกเป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำไปคอมปาวด์และขึ้นรูป

สำหรับการทดลองผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล ในสูตรที่ต้องการความยืดหยุ่นมากกว่า พบว่า กลีเซอรอลสามารถกระจายตัวในคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเมื่อมีน้ำเป็นสารช่วยกระจาย โดยอัตราส่วน คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ เท่ากับ 33.3/33.3/33.3 และหลังจากผสม ส่วนผสมจะถูกเก็บในภาชนะปิดที่ไม่มีอากาศผ่านเข้าออกเป็นเวลา 3 วัน ก่อนนำไปคอมปาวด์และขึ้นรูป รูปที่ 4.3 แสดงของผสมที่ได้จากการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ เท่ากับ 33.3/33.3/33.3



รูปที่ 4.2 การผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/แป้งมันสำปะหลัง/กลีเซอรอล/น้ำ ด้วยอัตราส่วน 35/35/27/3



รูปที่ 4.3 การผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส/กลีเซอรอล/น้ำ ด้วยอัตราส่วน 33.3/33.3/33.3




4.2 การเตรียมเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ

เม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ เตรียมจากสูตรคอมพาวด์ของการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE (ดังตารางที่ 3.2) ด้วยเครื่องผสมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ (Twin-screw extruder) โดยใช้สภาวะที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE ใช้สภาวะที่เหมาะสมที่แสดงไว้ในตารางที่ 3.4 หลังจากทำการตัดเม็ดคอมพาวด์ให้ได้ขนาดประมาณ 2-3 มม. จึงอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลา 2 ชม. เพื่อไล่ความชื้น เนื่องจากความชื้นจะทำให้เกิดรอยจุดบนเนื้อฟิล์มเนื่องจากการระเหยของน้ำเมื่อนำไปขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มในขั้นตอนต่อไป ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ แสดงในตารางที่ 4.1




เมื่อเปรียบเทียบผลของชนิดของพอลิเมอร์หลักต่อลักษณะของเม็ดคอมพาวด์ที่มีส่วนผสมอื่นเหมือนกัน ได้แก่ Ecoflex® กับ LLDPE พบว่า เม็ดคอมพาวด์ที่มี Ecoflex® เป็นส่วนประกอบหลักจะมีความขาวขุ่น ตัดเม็ดง่าย เม็ดมีรูปร่างใกล้เคียงกัน ส่วนเม็ดคอมพาวด์ที่มี LLDPE เป็นส่วนประกอบหลักจะมีความใส ตัดเม็ดค่อนข้างยากเนื่องจากวัสดุมีความเหนียว (Ductile) เม็ดที่ได้จึงมีลักษณะคล้ายหางเป็นเส้นบางๆ ติดอยู่ เมื่อเปรียบเทียบผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อลักษณะของเม็ดคอมพาวด์ที่มีส่วนผสมอื่นเหมือนกัน ได้แก่ LLDPE-CMC1-1TPS กับ LLDPE-CMC, Starch-Plas และ LLDPE-CMC1-1 กับ LLDPE-CMC-Plas พบว่าสูตรคอมพาวด์ที่ใส่กลีเซอรอลปริมาณมากกว่าจะมีความใสของเม็ดคอมพาวด์มากกว่า ส่วนผลของแป้งนั้นพบว่าคอมพาวด์สูตรที่เติมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่เหนียว และมันวาวมากกว่าสูตรที่ไม่เติมเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ส่วนผลของปริมาณน้ำต่อสูตรคอมพาวด์ที่ผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าการเติมน้ำปริมาณมากช่วยให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเข้ากับส่วนผสมอื่นได้ดีขึ้น แต่ในกระบวนการผสมจะมีไอน้ำออกมาในปริมาณมาก ทำให้ส่วนเติมสาร (Hopper) มีความชื้นสูง และมีไอน้ำเกาะที่อุปกรณ์ เป็นผลให้เกิดการอุดตันของวัตถุดิบที่ส่วนป้อนสาร และอาจเกิดความไม่ต่อเนื่องในกระบวนการป้อนวัตถุดิบ

จากตาราง 4.1 สามารถสรุปได้ว่าสามารถเตรียมเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพจากพอลิเมอร์หลักคือ Ecoflex® และ LLDPE และใช้ ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช เป็นส่วนประกอบรองได้ ด้วยเครื่องผสมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ โดยปริมาณ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช ที่ผสมเข้าไปและสามารถเตรียมเม็ดคอมพาวด์อยู่ในระดับไม่เกินร้อยละ 50 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าทั้งคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเทอร์โมพลาสติกสตาร์ช สามารถใช้เป็นส่วนผสมเพื่อทดแทน Ecoflex® ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ย่อยสลายได้ เพื่อลดต้นทุนของ Ecoflex® ซึ่งมีราคาแพงได้ นอกจากนี้ยังสามารถใช้เป็นส่วนผสมเพื่อทดแทน LLDPE ซึ่งเป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ที่ไม่ย่อยสลายได้อีกด้วย ผลการทดลองที่ได้จึงเป็นแนวทางในการประยุกต์ใช้วัสดุจากธรรมชาติที่ได้จากวัตถุดิบจากการเกษตรในการผลิตเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ เพื่อใช้งานทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียมที่ไม่ย่อยสลายได้



ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ

ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์	รายละเอียด
PBAT-CMC-Plas		<p>เม็ดค่อนข้างกลม สีขาว นวล ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็น ของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 160 °C</p>
PBAT-CMC,Starch-Plas		<p>เม็ดค่อนข้างรี สีขาว นวล ขนาดเส้นผ่าน ศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็น ของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 160 °C</p>
LLDPE-CMC-Plas		<p>เม็ดค่อนข้างกลม สี น้ำตาลอ่อน มีรอยของ การตัดขาด แสดง ลักษณะของความ เหนียว (Ductile) ขนาด เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 2-3 มม. ผิว มัน หลอมเป็นของเหลว ได้ที่อุณหภูมิ 180 °C</p>



ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์	อุณหภูมิหลอม °C
LLDPE-CMC,Starch-Plas		<p>เม็ดค่อนข้างกลม สีน้ำตาลอ่อนค่อนข้างนวลใส มีรอยของการตัดขาด แสดงลักษณะของความเหนียว (Ductile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 170 °C</p>
LLDPE-CMC 1-1		<p>เม็ดค่อนข้างกลม สีน้ำตาลอ่อน มีรอยของการตัดขาด แสดงลักษณะของความเหนียว (Ductile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 170 °C</p>
LLDPE-CMC 1-1 TPS		<p>เม็ดค่อนข้างกลม สีน้ำตาลอ่อน ค่อนข้างใส มีรอยของการตัดขาด แสดงลักษณะของความเหนียว (Ductile) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 170 °C</p>

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์	
LLDPE-CMC1%-TPS		<p>เม็ด ค้อน ข้างกลม สี น้ำตาลอ่อน ค้อนข้างใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 2-3 มม. ผิว มัน หลอมเป็นของเหลว ได้ที่อุณหภูมิ 170 °C</p>
LLDPE-CMC2%-TPS		<p>เม็ด ค้อน ข้างกลม สี น้ำตาลอ่อน ค้อนข้างใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 2-3 มม. ผิว มัน หลอมเป็นของเหลว ได้ที่อุณหภูมิ 160 °C</p>

ตารางที่ 4.1 ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพสูตรต่างๆ (ต่อ)

ชื่อสูตร	ลักษณะทางกายภาพของเม็ดคอมพาวด์	
LLDPE-CMC3%-TPS		เม็ดค่อนข้างกลม สีน้ำตาลอ่อน ค่อนข้างใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 170 °C
LLDPE-CMC4%-TPS		เม็ดค่อนข้างกลม สีน้ำตาลอ่อน ค่อนข้างใส ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 2-3 มม. ผิวมัน หลอมเป็นของเหลวได้ที่อุณหภูมิ 170 °C

4.3 การเป่าฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ

กระบวนการเป่าฟิล์มจัดเป็นกระบวนการขึ้นรูปที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมผลิตถุงพลาสติก เนื่องจากเป็นกระบวนการที่ใช้ผลิตสินค้าทั้งแบบหลอดและแผ่นในเวลาเดียวกัน การควบคุมความกว้างและความหนาของฟิล์มทำได้โดยการปรับความเร็วลมในการเป่า และความเร็วของเครื่องอัดรีด การควบคุมอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดฟิล์มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไดรฟ์แหวน อย่างไรก็ตามความสามารถในการขึ้นรูปรวมทั้งความกว้างและความหนาของฟิล์มยังขึ้นกับสมบัติและพฤติกรรมขณะขึ้นรูปของวัสดุอีกด้วย

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการทดลองขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบที่ได้เตรียมขึ้น ด้วยสภาวะการขึ้นรูปที่แสดงในตารางที่ 3.6-3.7 โดยเริ่มจากการนำเม็ด

พลาสติกมาหลอมที่อุณหภูมิเหมาะสมอย่างต่อเนื่องจนได้เป็นพลาสติกเหลวหนืด ซึ่งจะถูกดันให้ไหลผ่านไดน์วงแหวน จากนั้นเป่าลมเข้าทางศูนย์กลางไดน์วงแหวน แรงดันลมจะทำให้พลาสติกเหลวพองออกลักษณะเป็นลูกโป่งฟิล์ม ซึ่งจะถูกดึงออกจากไดน์วงแหวนอย่างต่อเนื่อง และเย็นตัวลงโดยการเป่าลมจากภายนอก หลังจากฟิล์มแข็งตัวดีแล้ว ฟิล์มจะถูกดึงและหนีบเป็นแผ่นให้ตั้งและส่งเก็บเข้าม้วน (รูปที่ 4.4) ลักษณะของการพองตัวของโป่งฟิล์มขณะขึ้นรูป และลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม แสดงในรูปที่ 4.5-4.10



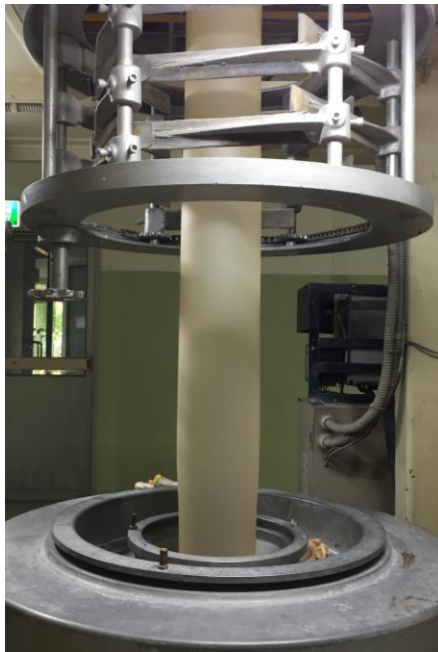
รูปที่ 4.4 การขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์ LLDPE-CMC, Starch-Plas



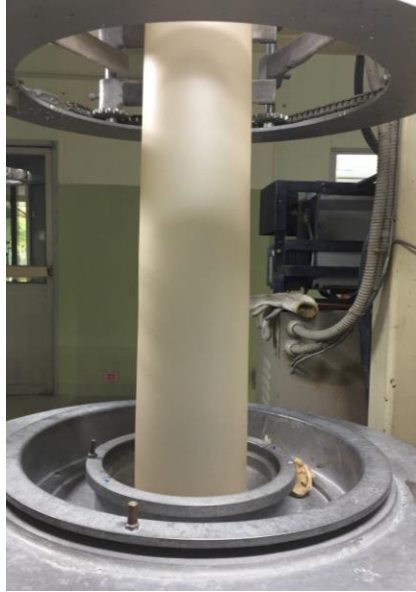
รูปที่ 4.5 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์ PBAT-CMC-Plas



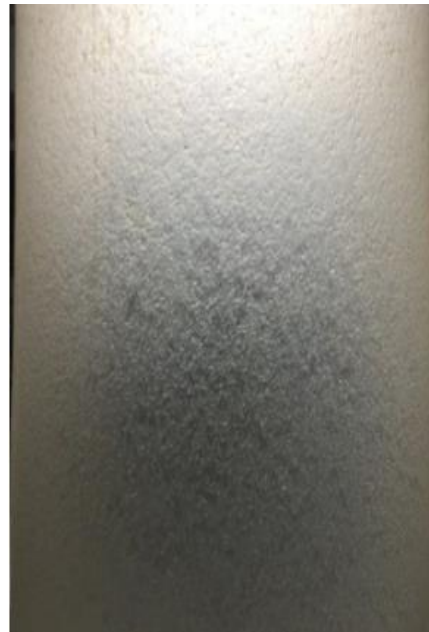
รูปที่ 4.6 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์ PBAT-CMC,Starch-Plas



รูปที่ 4.7 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์ LLDPE-CMC-Plas



รูปที่ 4.8 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์ LLDPE-CMC,Starch-Plas



รูปที่ 4.9 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์ LLDPE-CMC 1-1



รูปที่ 4.10 ลักษณะของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์ LLDPE-CMC 1-1 TPS

ผลสรุปที่ได้จากการศึกษาการขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมปาวด์พลาสติกฐานชีวภาพแสดงในตารางที่ 4.2

ตารางที่ 4.2 อุณหภูมิที่ได้นวงแหวน ความหนาของฟิล์ม ความกว้างของหลอดฟิล์ม และ Blow up ratio ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมปาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE

ชื่อสูตร	PBAT-CMC-Plas	PBAT-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC-Plas	LLDPE-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC 1-1	LLDPE-CMC 1-1 TPS
อุณหภูมิที่ได้นวงแหวน (°C)	150	140	160	160	180	180
ความสามารถในการขึ้นรูป	เป่าฟิล์มไม่ได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้
ความหนาของฟิล์ม (mm)	0.512–0.514	0.145–.220	0.184–0.280		0.122–0.185	0.090–0.116
ความกว้างของหลอดฟิล์ม (cm)	14.8	33.7	24.0	22.2	26.5	26.9
Blow up ratio	1.5	3.4	2.4	2.2	2.6	2.7

หมายเหตุ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงไดน์ เท่ากับ 10 cm

สืบเนื่องจากสมบัติเฉพาะตัวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการเชื่อมสลาย (270 °C) [40] ในโครงการวิจัยนี้จึงทำการผสมสารพลาสติกไซเซอร์ เช่น กลีเซอรอล และน้ำ เพื่อลดอุณหภูมิหลอมเหลวของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และทดลองหาสภาวะที่เหมาะสมในการขึ้นรูปฟิล์ม เช่น อุณหภูมิในแต่ละโซน ความหนืดของพอลิเมอร์หลอม ความเร็วรอบของสกรู แรงดันลม ความหนาของฟิล์ม การทำให้เย็น เป็นต้น อย่างไรก็ตามการผลิตเม็ดคอมพาวด์จากพลาสติกชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพียงชนิดเดียวนั้นไม่สามารถทำได้เนื่องจากธรรมชาติของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจะก่อเจลซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงผลึกบางส่วนทำให้เกิดลักษณะการเชื่อมขวางทางกายภาพ (Physical crosslink) ขึ้น ในระหว่างที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง และการก่อตัวนี้เองจึงเป็นสาเหตุให้เม็ดคอมพาวด์จากพลาสติกชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพียงชนิดเดียวไม่สามารถนำไปหลอมและเป่าฟิล์มได้ ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการผสมกับพอลิเมอร์อื่น ได้แก่ เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช Ecoflex® และ LLDPE เพื่อให้การขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มสามารถดำเนินไปได้

โดยทั่วไปการควบคุมอัตราส่วนของเส้นผ่านศูนย์กลางของหลอดฟิล์มต่อเส้นผ่านศูนย์กลางของไดน์วงแหวน (Blow up ratio) อยู่ในช่วง 2:1 ถึง 3:1 [37] ซึ่งเป็นอัตราส่วนปกติที่ใช้ในอุตสาหกรรมเป่าฟิล์ม จากตารางที่ 4.2 พบว่าตัวอย่างเม็ดคอมพาวด์ PBAT-CMC-Plas แสดงค่า Blow up ratio เท่ากับ 1.5 ทำให้การเป่าฟิล์มทำได้ยาก ฟิล์มที่ได้มีความหนามากกว่าค่าที่ยอมรับได้ (0.512–0.514 มม.) และในบางช่วงฟิล์มเกิดการฉีกขาด (รูปที่ 4.11) ซึ่งอาจเกิดจาก ค่าความแข็งแรงของพอลิเมอร์ขณะหลอม (Melt strength) ของ PBAT-CMC-Plas ต่ำ เมื่อได้รับแรงดันจึงฉีกขาดได้ง่าย ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าเม็ดคอมพาวด์ชีวภาพ PBAT-CMC-Plas ไม่เหมาะสมและไม่สามารถขึ้นรูปเป็นผลิตภัณฑ์โดยเทคนิคการเป่าฟิล์มได้



รูปที่ 4.11 การฉีกขาดของฟิล์ม PBAT-CMC-Plas ขณะเป่าขึ้นรูป

สำหรับเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE สูตรอื่นพบว่ามีความ Blow up ratio อยู่ในช่วง 2.2–3.4 ซึ่งเป็นค่าปกติของการเป่าฟิล์มในอุตสาหกรรมการผลิตถุงพลาสติก โดยค่าความหนาของฟิล์มจะแปรผกผันกับค่า Blow up ratio กล่าวคือ สูตรที่มีค่า Blow up ratio ต่ำ จะให้ฟิล์มที่มีความหนามาก และสูตรที่มีค่า Blow up ratio สูงกว่า จะให้ฟิล์มที่มีความหนาน้อยกว่า อย่างไรก็ตาม ยังมีปัจจัยอีกหลายอย่างที่ควบคุมความหนาของฟิล์ม เช่น ความหนืดของพอลิเมอร์ หลอม ความเร็วรอบของสกรู แรงดันลม และความเร็วของการเย็นตัว เป็นต้น จากตารางที่ 4.2 สามารถสรุปความสามารถในการเป่าขึ้นรูปของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาร์ช กับ Ecoflex® และ LLDPE เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้

LLDPE-CMC 1-1 TPS ~ LLDPE-CMC 1-1 > PBAT-CMC, Starch-Plas > LLDPE-CMC, Starch-Plas ~ LLDPE-CMC, Starch-Plas > PBAT-CMC-Plas

ดังที่กล่าวมาข้างต้นแล้วว่าคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่มีจุดหลอมเหลวสูงกว่าอุณหภูมิการเสื่อมสลาย และมักก่อเจล ซึ่งเป็นผลมาจากการจัดเรียงผลึกบางส่วนขึ้นในระหว่างที่เย็นตัวลงสู่อุณหภูมิห้อง ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงทดลองขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ เพื่อให้การขึ้นรูปทำได้ง่ายขึ้น และผลที่ได้แสดง ดังตารางที่ 4.3

ตารางที่ 4.3 อุณหภูมิที่ได้นวงแหวน ความหนาของฟิล์ม ความกว้างของหลอดฟิล์ม และ Blow up ratio ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

ชื่อสูตร	LLDPE-CMC1%- TPS	LLDPE-CMC2 %- TPS	LLDPE-CMC3 %- TPS	LLDPE-CMC4 %- TPS
อุณหภูมิที่ได้นวงแหวน (°C)	155	160	180	180
ความสามารถในการขึ้นรูป	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้	เป่าฟิล์มได้
ความหนาของฟิล์ม (mm)	0.020– 0.026	0.020– 0.026	0.023– 0.026	0.023– 0.027
ความกว้างของหลอดฟิล์ม (cm)	31.5	30.0	32.0	30.0
Blow up ratio	3.1	3.0	3.2	3.0

หมายเหตุ เส้นผ่านศูนย์กลางของวงไดน์ เท่ากับ 10 cm

จากตารางที่ 4.3 พบว่าเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ทุกสูตร และมีค่า Blow up ratio ใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วง 3.0–3.2 นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มทุกสูตรยังมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 20–27 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ทำถุงหูหิ้ว หรือถุงขยะ จึงสามารถสรุปได้ว่า เม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำมีศักยภาพที่จะพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ในเชิงพาณิชย์ได้ ลักษณะทางกายภาพของฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ แสดงดังรูปที่ 4.12

จากรูปที่ 4.12 พบว่าฟิล์มทุกสูตรที่ได้มีลักษณะทางกายภาพที่ใกล้เคียงกัน โดยไม่สามารถบอกความแตกต่างได้ด้วยตาเปล่า มีความสามารถในการส่องผ่านแสงได้ค่อนข้างดี มีเนื้อสัมผัสเนียน ลื่น เกิดเจลน้อย มีความหนาพอเหมาะในการใช้งานด้านฟิล์ม

4.4 การทดสอบสมบัติของฟิล์มที่เตรียมจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ

4.4.1 สมบัติเชิงกล

ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มตัวอย่างที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาซ กับ Ecoflex® และ LLDPE ได้แก่ PBAT-CMC,Starch-Plas LLDPE-CMC-Plas LLDPE-CMC,Starch-Plas LLDPE-CMC 1 -1 และ LLDPE-CMC 1-1 TPS เก็บในสภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ $23 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $70 \pm 5\%$ ก่อนนำไปทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึงเอนกประสงค์ ได้ผลการทดลองดังตารางที่ 4.4 และรูปที่ 4.13

ตารางที่ 4.4 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาซ กับ Ecoflex® และ LLDPE

ชื่อสูตร	PBAT-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC-Plas	LLDPE-CMC,Starch-Plas	LLDPE-CMC 1-1	LLDPE-CMC 1-1 TPS
ร้อยละการยืด ณ จุดขาด (%)	63.7±10	186±12	29.8±10	163±12	404.5±4.4
ความแข็งแรงดึง (MPa)	1.3±0.1	2.0±0.1	12±0.3	2.5±0.5	3.8±0.6
มอดูลัสของยัง (MPa)	7.9±1.7	25.6±1.2	20.1±2.0	53.6±2.5	45.8±3.4



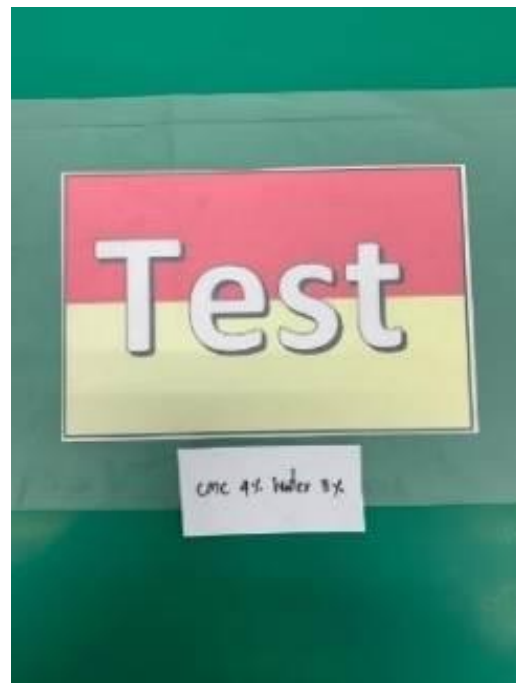
LLDPE-CMC1%-TPS



LLDPE-CMC2%-TPS

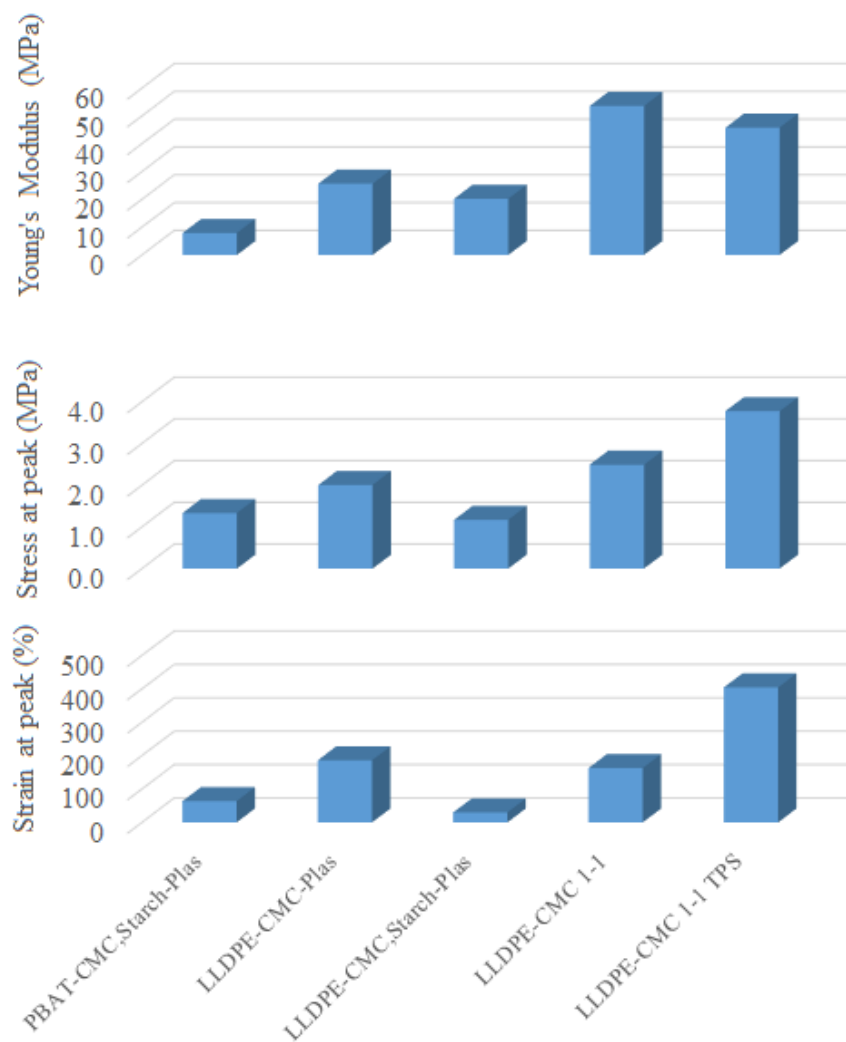


LLDPE-CMC3%-TPS



LLDPE-CMC4%-TPS

รูปที่ 4.12 फिल्मที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตา์ซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ



รูปที่ 4.13 ร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ กับ Ecoflex® และ LLDPE

ผลการทดสอบในรูปที่ 4.13 แสดงให้เห็นว่าฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ต่างกัน ได้แก่ Ecoflex® และ LLDPE มีสมบัติเชิงกลที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ Ecoflex® และ LLDPE เมื่อเทียบกับฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ Ecoflex® และ LLDPE ร่วมกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ได้แก่ PBAT-CMC, Starch-Plas และ LLDPE-CMC, Starch-Plas พบว่า ฟิล์มทั้งสองสูตรมีค่าความแข็งแรงดึงใกล้เคียงกัน คือ 1.3 MPa และ 1.2 MPa ตามลำดับ อย่างไรก็ตามพบว่าฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ LLDPE แสดงค่ามอดูลัสของยังสูงกว่า (20 MPa และ 7.9 MPa) ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ Ecoflex® แต่ให้ค่าระยะยืดต่ำกว่า (29 % และ 63%) ทั้งนี้ความแตกต่างดังกล่าวมาจากสมบัติเฉพาะตัวของพอลิเมอร์ทั้งสองชนิดที่ต่างกัน และความเข้ากันได้ที่แตกต่างกันของ Ecoflex® และ LLDPE กับ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส และเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์ ดังแสดงในตารางที่ 4.5

ตารางที่ 4.5 สมบัติบางประการของ Ecoflex® และ LLDPE

Polymer	Tensile strength (MPa)	Tensile Modulus (MPa)	Elongation at break (%)
LLDPE [50]	30.0 - 75.8 (MD)	150 - 310 (MD)*	470 - 1140 (MD)
	20.0 - 65.5 (TD)	134 - 400 (TD)*	520 - 1450 % (TD)
Ecoflex® [51]	9±0.42	41	164±8.95

*Secant modulus

การศึกษาผลของปริมาณกลีเซอรอลต่อสมบัติของฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช และ LLDPE เหมือนกัน พบว่า ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณมาก (LLDPE-CMC 1-1 และ LLDPE-CMC 1-1 TPS) มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณน้อย (LLDPE-CMC-Plas และ LLDPE-CMC,Starch-Plas) ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก กลีเซอรอลพลาสติกไซเซอร์มีส่วนช่วยในการเพิ่มความยืดหยุ่นของฟิล์ม และในขณะเดียวกันการเกิดพันธะไฮโดรเจนระหว่างกลีเซอรอลกับคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแป้งนั้นช่วยให้ฟิล์มมีความแข็งแรงมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยังของฟิล์มที่มีปริมาณกลีเซอรอลมากสูงขึ้น

การศึกษาผลของอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำต่อสมบัติของฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลัก ได้แก่ คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช และ LLDPE เหมือนกัน พบว่า ฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำน้อย (LLDPE-CMC 1-1 และ LLDPE-CMC 1-1 TPS) มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่อัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำมาก (LLDPE-CMC-Plas และ LLDPE-CMC,Starch-Plas) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำปริมาณมากกว่าจะช่วยให้คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสซึ่งสามารถละลายน้ำได้คลายตัวออกจากกันมากขึ้น แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยตัวเองจึงน้อยลง ส่งผลให้โมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสสามารถเกิดแรงดึงดูดกับกลีเซอรอลและแป้งได้ดียิ่งขึ้น จึงมีสมบัติเชิงกลที่ดีขึ้นตามไปด้วย

จากผลการทดสอบสมบัติเชิงกลของของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรช กับ Ecoflex® และ LLDPE สามารถสรุปได้ว่า ถึงแม้ว่า LLDPE เป็นพอลิเมอร์ที่ไม่สามารถย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพ แต่ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของ LLDPE มีสมบัติเชิงกลที่ดีและมีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมกับการใช้ในงานฟิล์มมากกว่า Ecoflex® และการผสมคาร์บอกซีเมทิล

เซลลูโลสในปริมาณที่มากเกินไป ทำให้กระบวนการขึ้นรูปทำได้ไม่ดีนัก เนื่องจากการเกิดเจลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พิล์มที่ได้มีความหนาเกินไป และเป็นข้อจำกัดในการใช้งานบางประเภท ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงมุ่งความสนใจไปยังการพัฒนาฟิล์มที่เป่าขึ้นรูปจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

4.4.2 การศึกษาสมบัติของฟิล์มที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

เพื่อให้การขึ้นรูปโดยการเป่าฟิล์มทำได้ง่ายขึ้น คณะผู้วิจัยจึงได้ทดลองขึ้นรูปฟิล์มจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ ค่าดัชนีการไหล และความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพที่นำมาเป่าขึ้นรูป และความหนาของฟิล์มที่ได้จากการขึ้นรูป แสดงในตารางที่ 4.6

ตารางที่ 4.6 ดัชนีการไหล และความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเร็กซ์กับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ

ชื่อสูตร	LLDPE-CMC1%- TPS	LLDPE-CMC2 %- TPS	LLDPE-CMC3 %- TPS	LLDPE-CMC4 %- TPS
ดัชนีการไหล (g/10 min)	1.464	1.464	1.412	1.680
ความหนาแน่น (g/mL)	0.976	0.971	0.976	0.981
ความหนาของฟิล์ม (mm)	0.020– 0.026	0.020– 0.026	0.023– 0.026	0.023– 0.027

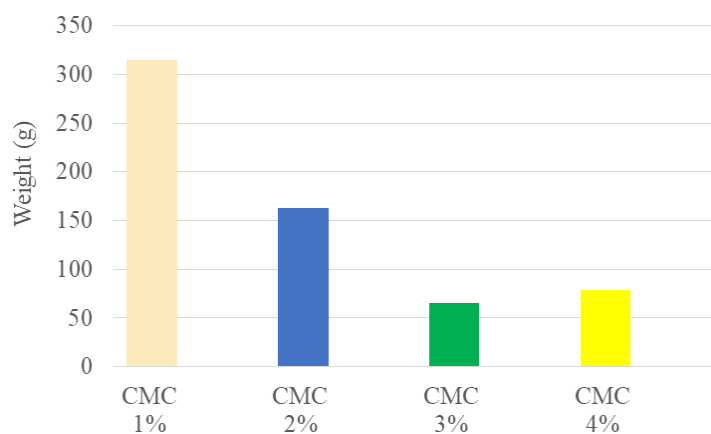
ผลจากการวัดดัชนีการไหลของเม็ดคอมพาวด์ตามวิธีมาตรฐาน ASTM 1238 โดยใช้อุณหภูมิในการทดสอบเท่ากับ 190°C ต้มน้ำหนัก 2.16 Kg พบว่าค่าดัชนีการไหลมีค่าอยู่ในช่วง 1.4–1.6 ซึ่งจัดอยู่ในช่วงปกติที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าดัชนีการไหลของเม็ด LLDPE เกรดการค้าที่ใช้สำหรับเป่าฟิล์ม (0.50 - 36 g/10 min) [50] และเมื่อพิจารณาผลของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ค่าดัชนีการไหลของเม็ดคอมพาวด์ก็มีค่าเพิ่มตามไปด้วย ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการเกิดเจลภายในโครงสร้างของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น ดังนั้นพันธะไฮโดรเจนซึ่งเป็นแรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับแป้งจึงลดลง เป็นสาเหตุให้ค่าดัชนีการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับการทดลองของ Garg and Jana [52] ที่กล่าวว่าค่าดัชนีการไหลของเม็ด LLDPE/TPS เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของแป้ง นอกจากนี้ การเกิดเจลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสยังสังเกตเห็นได้ชัดจากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ซึ่งจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

เมื่อพิจารณาค่าความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์ที่วัดตามวิธีมาตรฐาน ASTM D792 โดยจากการชั่งน้ำหนักในอากาศ น้ำ และไอโซโพรพานอล พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.97–0.98 g/mL ซึ่งจัดอยู่ในช่วงปกติที่ค่อนข้างต่ำเมื่อเทียบกับค่าดัชนีการไหลของเม็ด LLDPE เกรดการค้าที่ใช้สำหรับเป่าฟิล์ม (0.912 - 0.937 g/mL) [50] เมื่อปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสต่อความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์ พบว่าความหนาแน่นของเม็ดคอมพาวด์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้อาจเกิดจากเจลที่เกิดขึ้นจะทำให้แรงดึงดูดระหว่างโมเลกุลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสและแป้งถูกทำลาย [53]

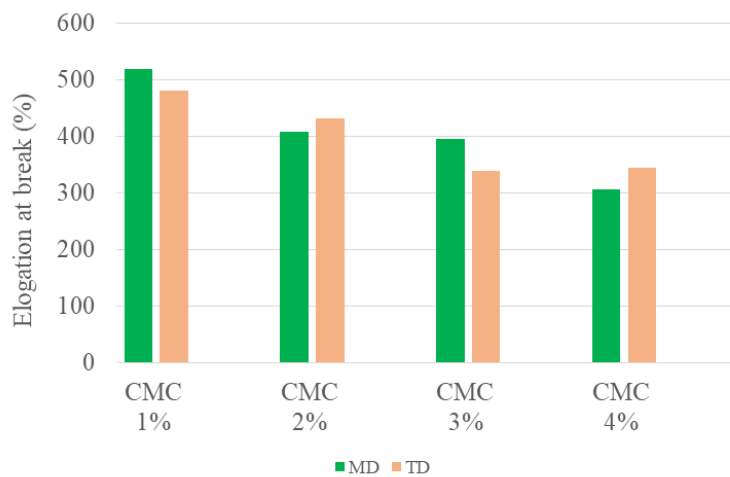
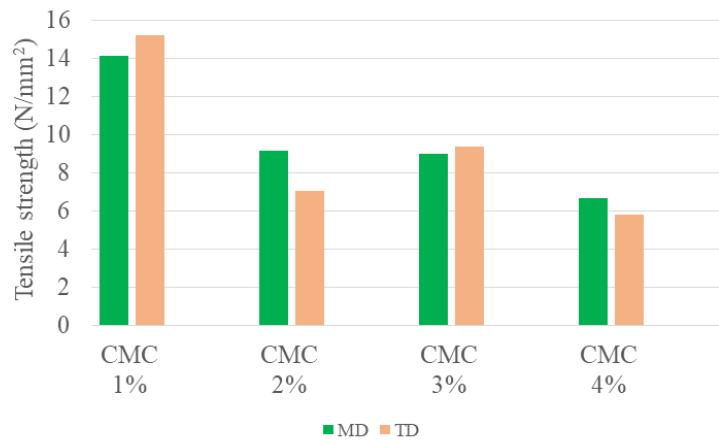
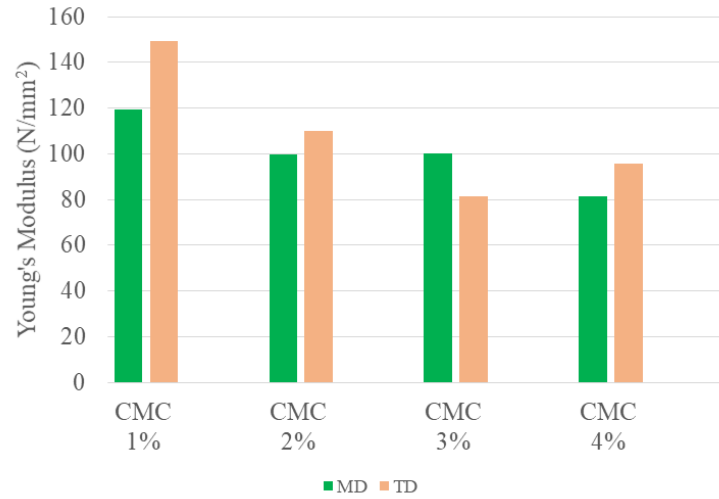
และเมื่อพิจารณาผลที่ได้จากการวัดความหนาของฟิล์มโดยใช้เวอร์เนียคาลิเปอร์ ระบบดิจิทัล โดยวัดทั้งหมด 5 จุด ภายในฟิล์มที่มีพื้นที่หน้าตัด 5 cm × 5 cm พบว่าฟิล์มมีความหนาอยู่ในช่วง 20–27 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับความหนาของฟิล์มที่ใช้ทำถุง

4.4.2.1 ความต้านทานต่อการตกกระแทก

การวัดความต้านทานต่อการตกกระแทกของฟิล์ม ทำตามวิธีมาตรฐาน ASTM D1709. โดยตัดฟิล์มตัวอย่างให้มีขนาด 22.0 cm × 22.0 cm ล้วนทำไปวางไว้บนที่วางตัวอย่างและลือคให้ตั้ง กำหนดความระยะห่างระหว่างหัวลูกตุ้มน้ำหนักถึงผิวหน้าตัวอย่าง (ความสูงของลูกตุ้ม) เท่ากับ 66 cm แล้วปล่อยลูกตุ้มที่มีน้ำหนักตั้งแต่ 20-390 g (ค่อยๆ เพิ่มน้ำหนักลูกตุ้มขึ้นเรื่อยๆ) ให้ลูกตุ้มตกกระแทกกับฟิล์มที่ขึงไว้ อ่านค่าน้ำหนักลูกตุ้มที่กระแทกแล้วทำให้ฟิล์มขาด ผลการทดสอบความต้านทานต่อการตกกระแทกแสดงค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่กระแทกจนฟิล์มขาด แสดงในรูปที่ 4.14



รูปที่ 4.14 ค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่กระแทกจนฟิล์มขาดของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ซกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ (CMC1%, CMC2%, CMC3% และ CMC4% หมายถึงฟิล์มที่ได้จากคอมพาวด์ LLDPE-CMC1%-TPS, LLDPE-CMC2%-TPS, LLDPE-CMC3%-TPS และ LLDPE-CMC4%-TPS ตามลำดับ)



รูปที่ 4.15 มอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสไตร์ชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ (CMC1%, CMC2%, CMC3% และ CMC4% หมายถึงฟิล์มที่ได้จากคอมพาวด์ LLDPE-CMC1%-TPS, LLDPE-CMC2%-TPS, LLDPE-CMC3%-TPS และ LLDPE-CMC4%-TPS ตามลำดับ)

จากรูปที่ 4.14 พบว่าค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่กระแทกจนฟิล์มขาดของฟิล์ม LLDPE-CMC1%-TPS มีค่าสูงที่สุดเท่ากับ 314.5 g คิดเป็นค่าพลังงานเท่ากับ 2.304 KJ แต่เมื่อเพิ่มปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสพบว่าค่าน้ำหนักของลูกตุ้มที่กระแทกจนฟิล์มขาดมีค่าลดลงอย่างมาก 163.2 g (1.055 KJ) สำหรับฟิล์ม LLDPE-CMC2%-TPS 65.9 g (0.426 KJ) สำหรับฟิล์ม LLDPE-CMC3%-TPS และ 78.6 g (0.496 KJ) สำหรับฟิล์ม LLDPE-CMC4%-TPS ผลที่เกิดขึ้นแสดงให้เห็นว่าความสามารถในการรับแรงกระแทกที่แย่งของฟิล์มเป็นผลมาจากปริมาณเจลที่เกิดขึ้นเนื่องจากปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้น

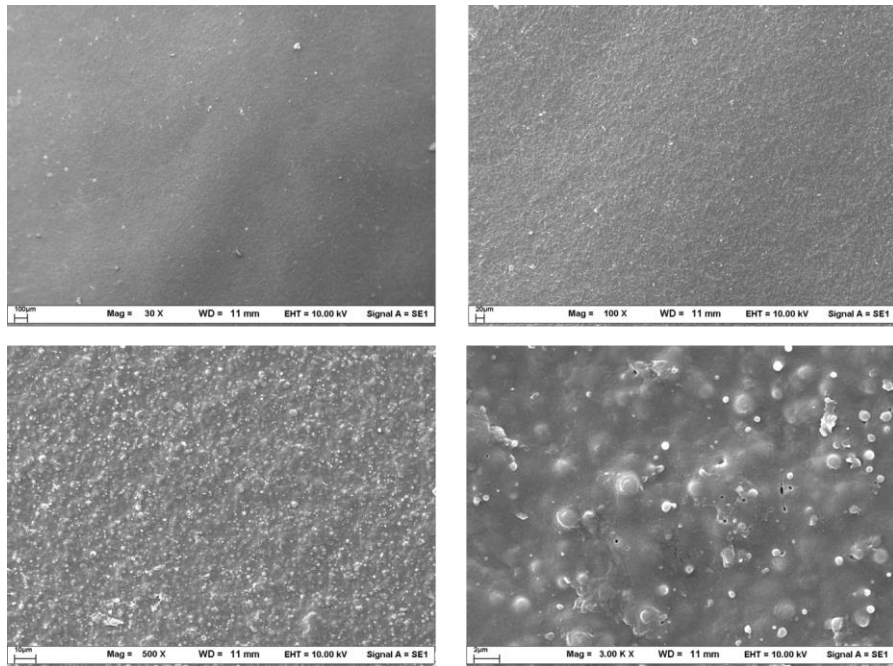
4.4.2.2 สมบัติเชิงกล

รูปที่ 4.15 แสดงผลของปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ต่อค่ามอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ จากรูปพบว่าทั้งค่ามอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์ม ลดลงเมื่อฟิล์มมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากการเกิดเจลที่เพิ่มขึ้นทำให้เนื้อฟิล์มแสดงความเข้ากันไม่ได้ (Non-homogeneity) เพิ่มขึ้น การรับส่งแรงที่มากระทำระหว่างพอลิเมอร์ผสมจึงแย่งส่งผลให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มผสมลดลงไปตามไปด้วย ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวิจัยของ Nguyen และคณะ [54] ที่เสนอว่าความเข้ากันไม่ได้ของฟิล์ม LLDPE/TPS เป็นสาเหตุให้สมบัติเชิงกลของฟิล์มแย่ง

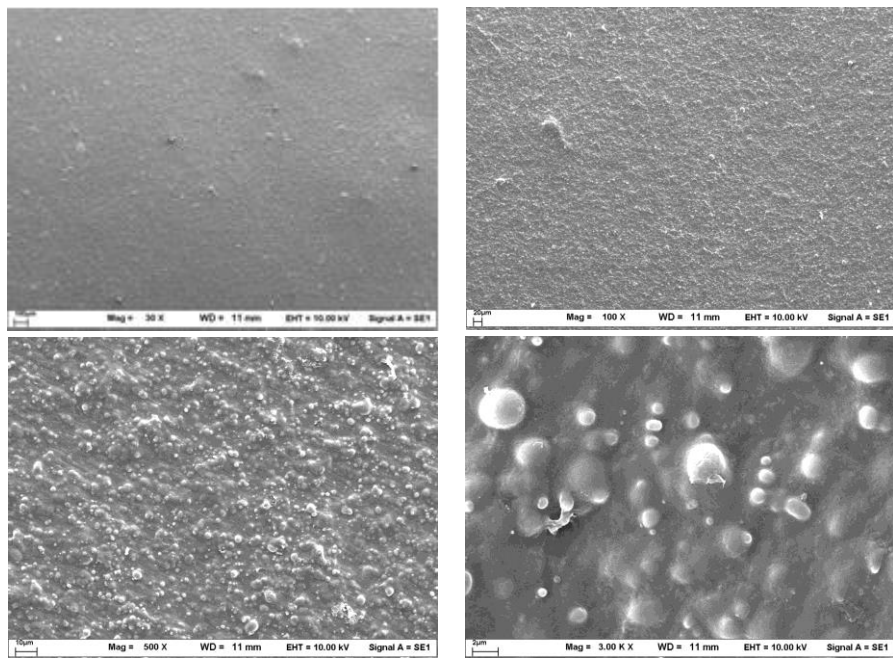
4.4.2.3 สันฐานวิทยา

ลักษณะสันฐานวิทยาของฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ จากภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดของฟิล์มที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า แสดงในรูปที่ 4.16-4.19 และลักษณะสันฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มที่ไม่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ LLDPE-TPS ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพที่มีส่วนประกอบเหมือนกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ แสดงในรูปที่ 4.20

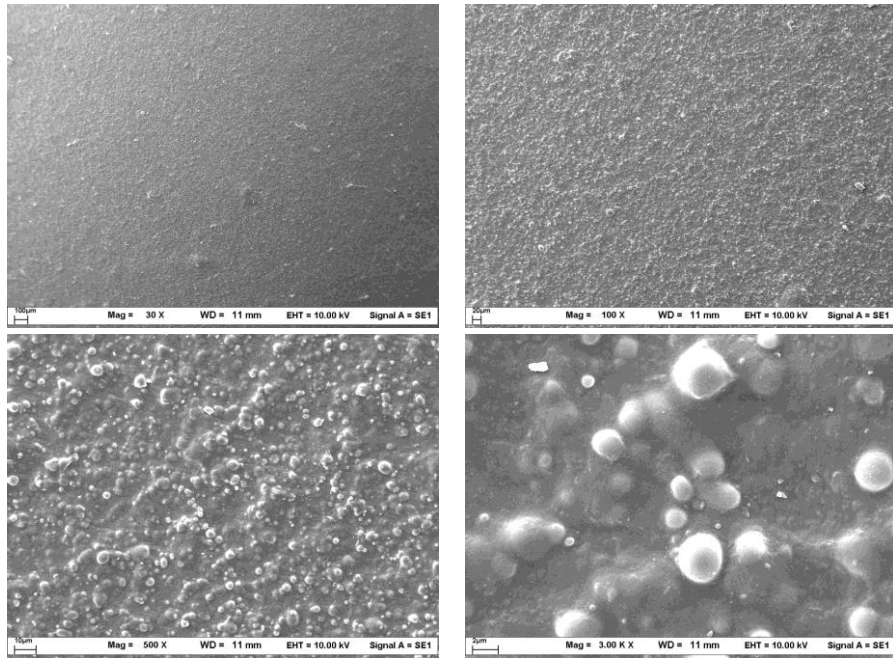
จากรูปพบว่าฟิล์ม LLDPE-TPS ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพที่มีส่วนประกอบเหมือนกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาซกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำมีการเกิดเจลของแป้งมันสำปะหลังอย่างชัดเจน เมื่อพิจารณาจากภาพถ่ายกำลังขยาย 500 เท่าขึ้นไปแสดงให้เห็นว่าการเกิดเจลในฟิล์มนี้ไม่สามารถมองเห็นด้วยตาเปล่า เมื่อเติมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสพบว่าการเกิดเจลเพิ่มขึ้นอย่างเห็นได้ชัดและกระจายอย่างสม่ำเสมอบนพื้นผิวของฟิล์ม และขนาดและปริมาณของเม็ดเจลจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่าการเกิดเจลของทั้งแป้งและคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นสาเหตุให้ความเข้ากันได้ขององค์ประกอบลดลง ฟิล์มมีเนื้อหยาบและขรุขระมากขึ้น



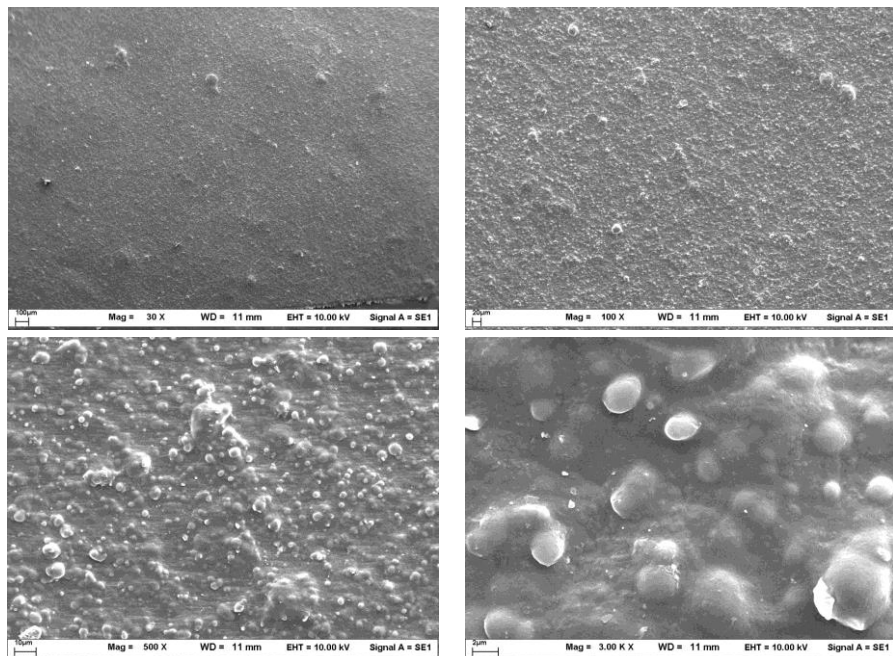
รูปที่ 4.16 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC1%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า



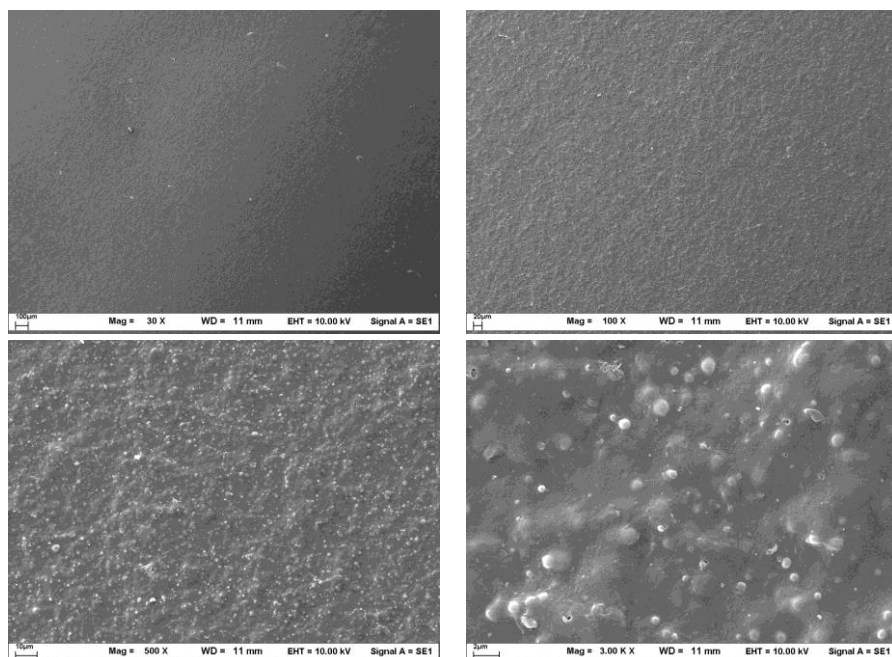
รูปที่ 4.17 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC2%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า



รูปที่ 4.18 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC3%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า



รูปที่ 4.19 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์ม ที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพ LLDPE-CMC4%-TPS ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า



รูปที่ 4.20 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวของฟิล์มที่ไม่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ LLDPE-TPS ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพที่มีส่วนประกอบเหมือนกับฟิล์มที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสไตรซ์กับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ ที่กำลังขยาย 30 100 500 และ 3000 เท่า

4.5 การสำรวจความพึงพอใจของถุงหิ้วที่ผลิตจากฟิล์มที่เตรียมจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพ

ฟิล์มที่สามารถขึ้นรูปได้จากงานวิจัยนี้ทั้งหมด 7 สูตร ได้แก่ PBAT-CMC, Starch-Plas LLDPE-CMC-Plas LLDPE-CMC, Starch-Plas LLDPE-CMC 1-1 LLDPE-CMC 1-1 TPS LLDPE-CMC1% -TPS และ LLDPE-CMC2%-TPS (รูปที่ 4.21-4.27) ได้ถูกนำมาทดลองขึ้นรูปเป็นถุงหิ้ว และนำไปเป็นตัวอย่างถุงหิ้วเพื่อรับการประเมินจากผู้ตอบแบบสำรวจความพึงพอใจ



รูปที่ 4.21 ถุงหูหิ้ว F5 จากฟิล์ม PBAT-CMC,Starch-Plas



รูปที่ 4.22 ถุงหูหิ้ว F3 จากฟิล์ม LLDPE-CMC-Plas



รูปที่ 4.23 ถุงหูหิ้ว F4 จากฟิล์ม LLDPE-CMC,Starch-Plas



รูปที่ 4.24 ถุงหูหิ้ว F1 จากฟิล์ม LLDPE-CMC 1-1



รูปที่ 4.25 ถุงหิ้ว F2 จากฟิล์ม LLDPE-CMC 1-1 TPS



รูปที่ 4.26 ถุงหิ้ว F6 จากฟิล์ม LLDPE-CMC1%-TPS

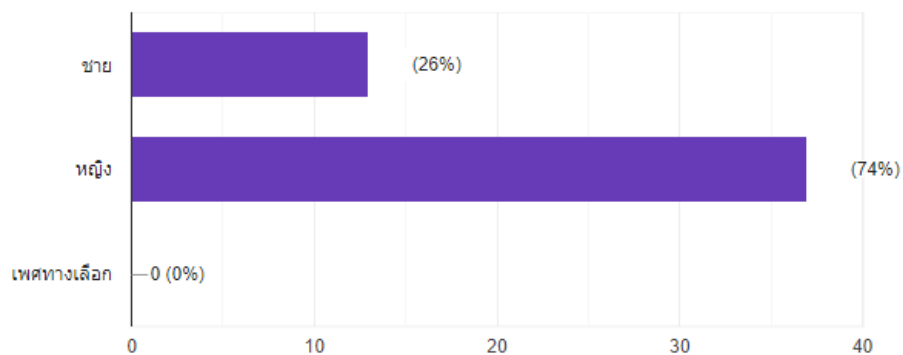


รูปที่ 4.27 ถุงหิ้ว F7 จากฟิล์ม LLDPE-CMC2%-TPS

ผลจากการสำรวจความพึงพอใจของถุงหิ้วที่ผลิตจากฟิล์มที่เตรียมจากเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพทั้งหมด 7 สูตร เป็นดังนี้

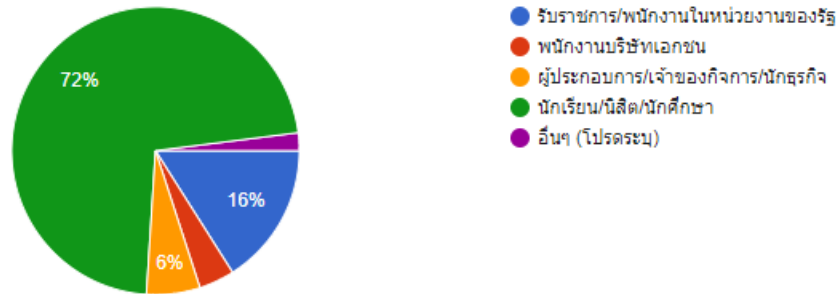
ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

1. เพศ

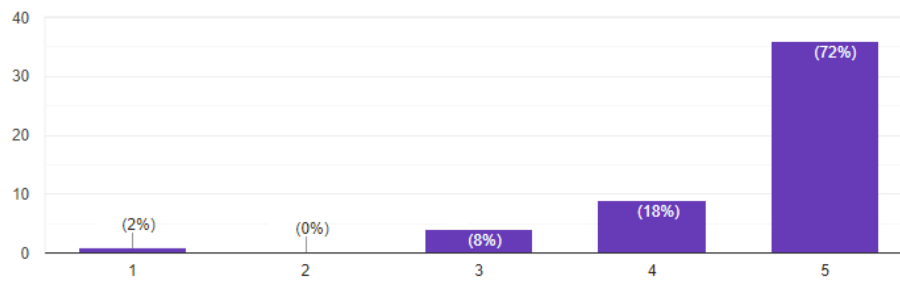


2 อาชีพ

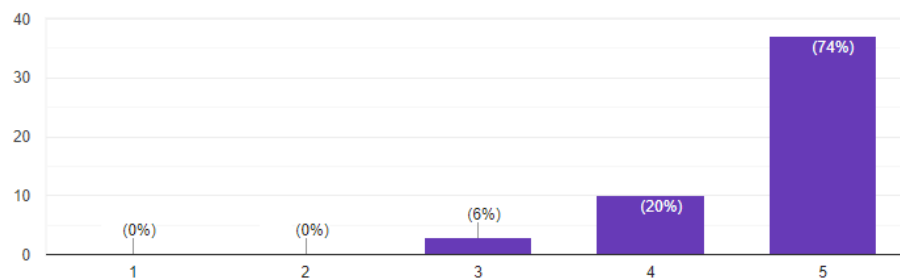
3



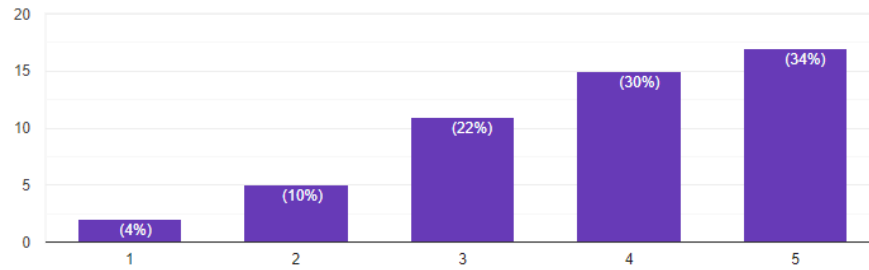
3. ท่านตระหนักถึงปัญหาการปนเปื้อนของขยะพลาสติกที่ไม่ย่อยสลายในสิ่งแวดล้อม



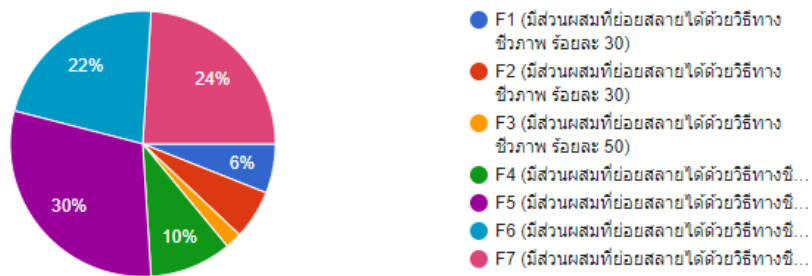
4. ท่านยินดีจะให้ความร่วมมือในการจัดการหรือลดปัญหาขยะพลาสติก



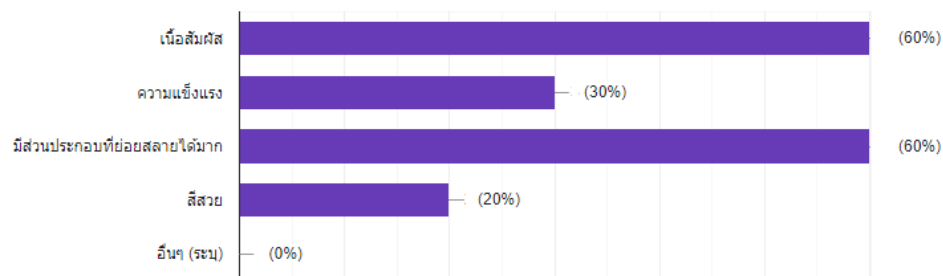
5. ท่านรู้จักหรือเคยรับรู้เกี่ยวกับพลาสติกย่อยสลายได้ด้วยวิธีทางชีวภาพที่ไม่เป็นพิษต่อสิ่งแวดล้อม



6. ถุงหิ้ว BioPlas สูตรใดที่ท่านมีความพึงพอใจมากที่สุด



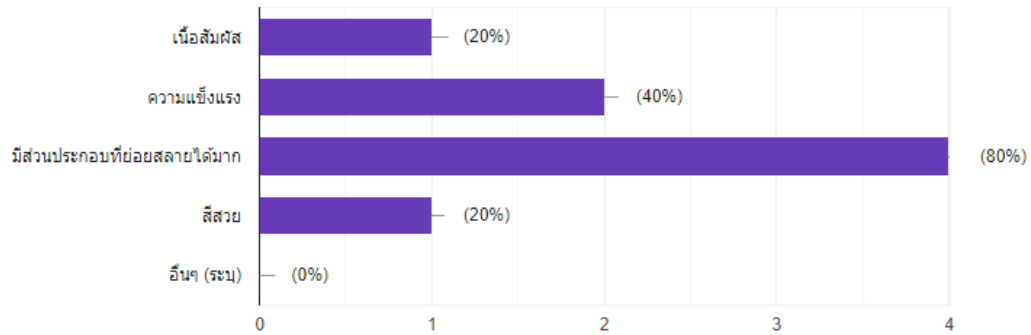
7. (เฉพาะผู้ตอบ F1 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหิ้ว BioBag สูตร F1 ==ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



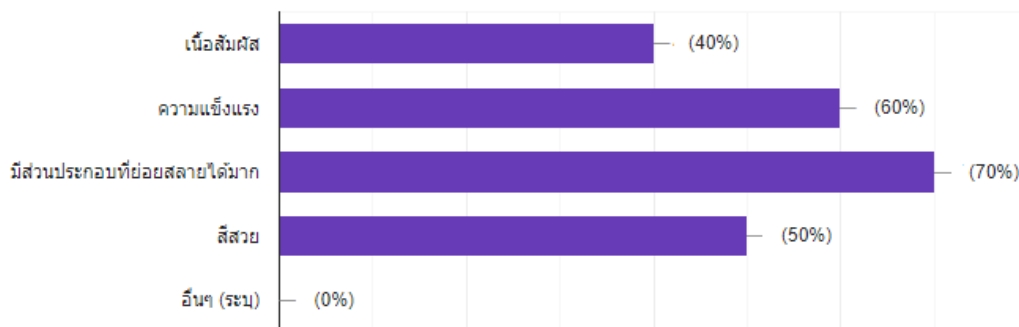
8. (เฉพาะผู้ตอบ F2 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBioBag สูตร F2 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



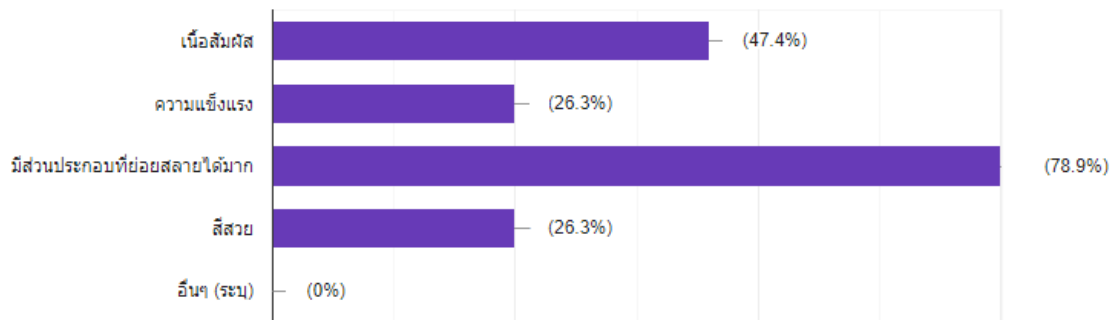
9. (เฉพาะผู้ตอบ F3 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBioBag สูตร F3 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



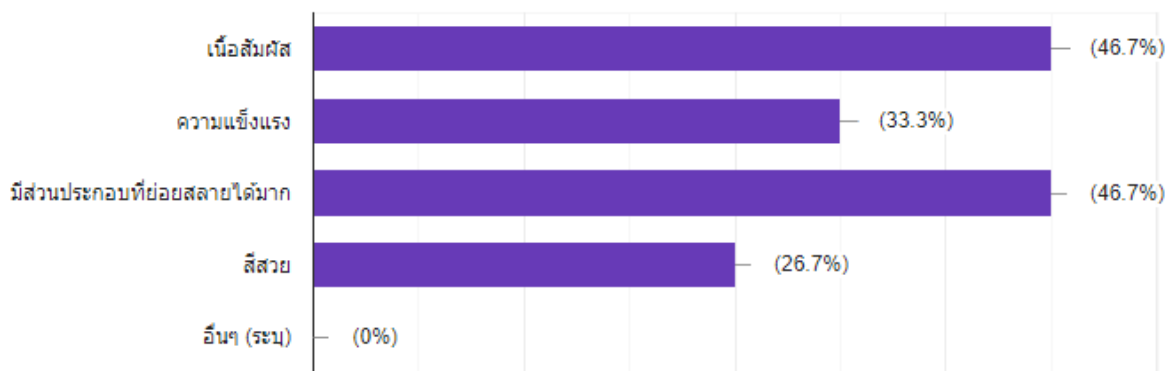
10. (เฉพาะผู้ตอบ F4 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBioBag สูตร F4 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



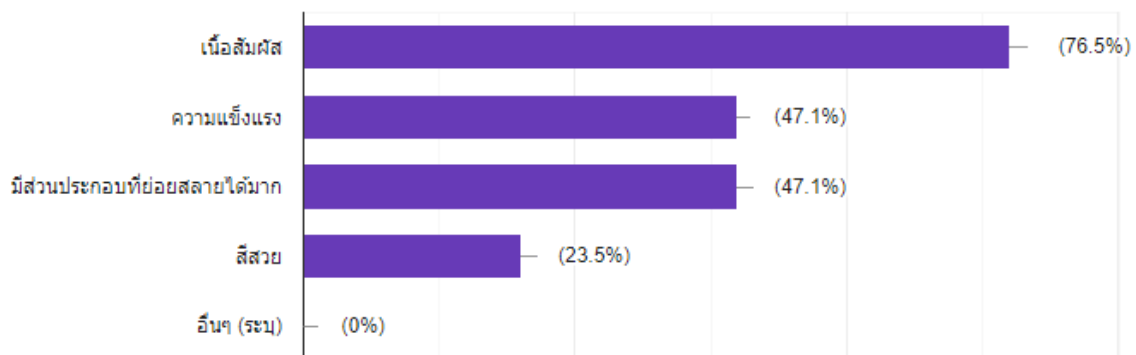
11. (เฉพาะผู้ตอบ F5 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBioBag สูตร F5 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



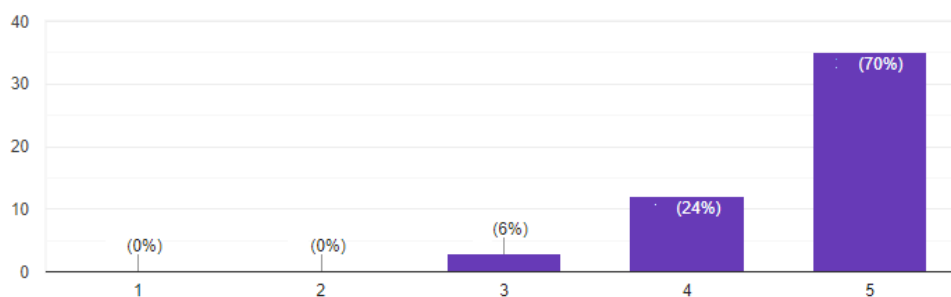
12. (เฉพาะผู้ตอบ F6 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBioBag สูตร F6 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



13. (เฉพาะผู้ตอบ F7 เท่านั้น) เลือกข้อดีของถุงหูหิ้วBiobag สูตร F7 ===ตอบได้มากกว่า 1 ข้อ



14. ท่านมีความต้องการใช้งานพลาสติกที่มีส่วนผสมจากธรรมชาติที่สามารถย่อยสลายได้เพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม



15. ข้อเสนอแนะที่ท่านต้องการให้นักวิจัยปรับปรุงเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์ถุงหูหิ้วBioBag

ไม่มี

-

F6

หาวัตถุดิบที่สามารถย่อยสลายได้ 100%

ดีมาก

สร้างความแข็งแรงให้มากกว่านี้

ดีงามมาก รักโลกกก

กลิ่นของถุงพลาสติก

อยากให้ทำถุงที่ใหญ่กว่านี้เพื่อจะได้ใช้งานได้หลากหลายมากขึ้น

อยากให้เพิ่มสีของถุงแต่นำมาจากธรรมชาติอีกด้วย

มีสีส้น

ดีค่ะแต่อยากรู้ว่าบรรจุได้เยอะไหม

ควรให้ย่อยสลายร้อยเปอร์เซ็นต์และราคาไม่แพงมาก

ควรปรับปรุงให้มีเนื้อสัมผัสดีขึ้น

เนื้อควรเหนียว

ควรย่อยสลายได้ 100%

และตรวจสอบด้วยวิธีมาตรฐาน

ควรพิจารณาเพิ่มเน้นลดสายที่บริเวณผิวหน้าหรืออาจจะเพิ่ม pigment เข้าไปในกระบวนการผลิต ถุง BioBag ควร
หาวัตถุดิบที่หลากหลายหลากหลายมากในการผลิต จะได้มีทางเลือกมากขึ้นในกระบวนการผลิต และส่งเสริมให้มีการพัฒนา
ต่อยอดในการตลาดต่อไปได้

ไม่มีคร่ำ

ต้องการราคาถูก

ความแข็งแรง และน้ำหนักที่สามารถรับได้ให้สูงขึ้น

ถุงยังไม่ค่อยแข็งแรง

ขอสีเขียวๆ

—

ดีค่ะ

ลดต้นทุนเพื่อให้เกิดการซื้อขายได้

ทำใบใหญ่กว่านี้

ไม่มีค่ะ

ดีมากเลยค่ะ

ได้

ขนาดที่ใหญ่ขึ้น สู้เพื่อความสบาย

อยากให้ย่อยให้ได้แน่นอน 100% และทนทาน

ระยะเวลาในการย่อยสลายที่เร็วขึ้น

ควรพัฒนาแล้วเอามาจำหน่าย

4.6 การจัดอบรมเพื่อประชาสัมพันธ์และถ่ายทอดเทคโนโลยี

โครงการอบรมเรื่อง ไบโอฟลาสติก จากต้นน้ำ...สู่ปลายน้ำ จัดขึ้นเมื่อวันศุกร์ ที่ ๑๙ กรกฎาคม ๒๕๖๒ เวลา ๘.๓๐ ถึง ๑๖.๓๐ น. ณ ห้อง CL-202 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ. ชลบุรี การจัดอบรมครั้งนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการบูรณาการวิจัยเรื่อง การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพจากขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรในระดับอุตสาหกรรม ซึ่งได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาลประจำปี พ.ศ. 2562 ในการดำเนินการวิจัย และถ่ายทอดองค์ความรู้ นวัตกรรม เทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอฟลาสติก ที่เป็นผลผลิตจากการวิจัย ให้แก่ภาคส่วนที่เกี่ยวข้อง เพื่อให้เกิดความเข้าใจและเล็งเห็นถึงศักยภาพของประเทศไทย ในการผลิตพลาสติกชีวภาพอย่างครบวงจร ตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ อันจะเป็นแนวทางในการตอบโจทย์การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพครบวงจรของประเทศไทย ต่อไปในอนาคต

ในการอบรมครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อ

- 1) ถ่ายทอดองค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีที่เกี่ยวข้องกับการผลิตไบโอฟลาสติก อันจะเป็นแนวทางในการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพครบวงจรของประเทศไทย
- 2) เป็นช่องทางให้นักวิจัยของมหาวิทยาลัยได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ ตลอดจนการสร้างเครือข่ายวิจัยกับภาคอุตสาหกรรม รัฐวิสาหกิจชุมชน และผู้ประกอบการ

โดยผู้เข้าร่วมอบรม ประกอบไปด้วย ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติก อาจารย์ นักวิจัย นิสิต-นักศึกษา ผู้นำชุมชน และผู้สนใจทั่วไป จำนวนรวมทั้งสิ้น 43 คน ได้รับการสนับสนุนวิทยากรจากหลายหน่วยงาน ดังนี้

1. รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ จากภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. เศรษฐวัชร ฉ่ำศาสตร์ จากภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
3. คุณอัญญา กำจายกิตติกุล ผู้อำนวยการฝ่ายวิจัยและพัฒนา บริษัทมัลติแบกซ์ จำกัด (มหาชน) และ
4. คุณเชิดธวัช วรรณการ กรรมการผู้จัดการ บริษัท ฟลูเอนท์ จำกัด

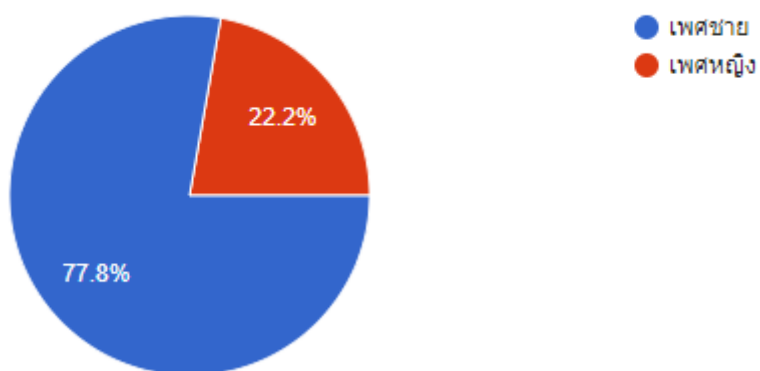
วิธีการอบรม ใช้การบรรยาย อภิปราย เยี่ยมชมโรงงานต้นแบบวิศวกรรมชีวเคมี การแลกเปลี่ยนความรู้/ความคิดเห็นระหว่างผู้เข้าอบรม และชมนิทรรศการผลงานวิจัย และเมื่อจบการอบรมครั้งนี้แล้ว คณะผู้จัดอบรมมุ่งหวังว่าผู้เข้าร่วมอบรมทุกท่าน จะได้รับองค์ความรู้เกี่ยวกับเทคโนโลยีการผลิตไบโอฟลาสติก เพื่อใช้เป็นแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมไบโอฟลาสติกครบวงจรในประเทศไทยต่อไป นอกจากนี้ผู้เข้าอบรมทุกท่านจะได้ใช้โอกาสนี้ใน

การสร้างเครือข่ายความร่วมมือระหว่างกัน และ รับผิดชอบต่อการทำงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ กับนักวิจัยในมหาวิทยาลัยอีกด้วย

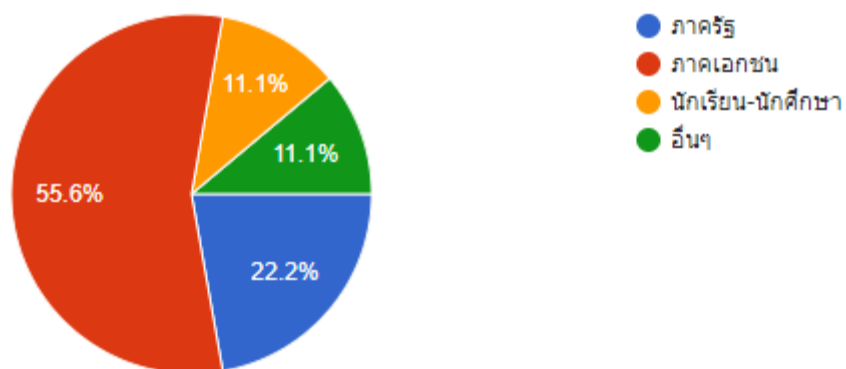
ภาพบรรยากาศในการอบรม แสดงไว้ในภาคผนวก และผลการสำรวจความพึงพอใจของผู้เข้าร่วมงานอบรม เป็นดังนี้

ส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับผู้ตอบแบบสอบถาม

1.1 เพศ



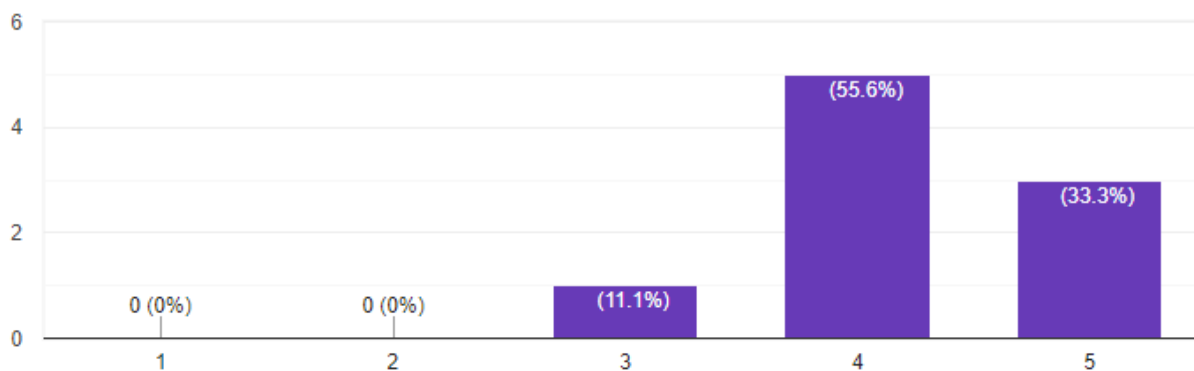
1.2 บุคคลากรจาก



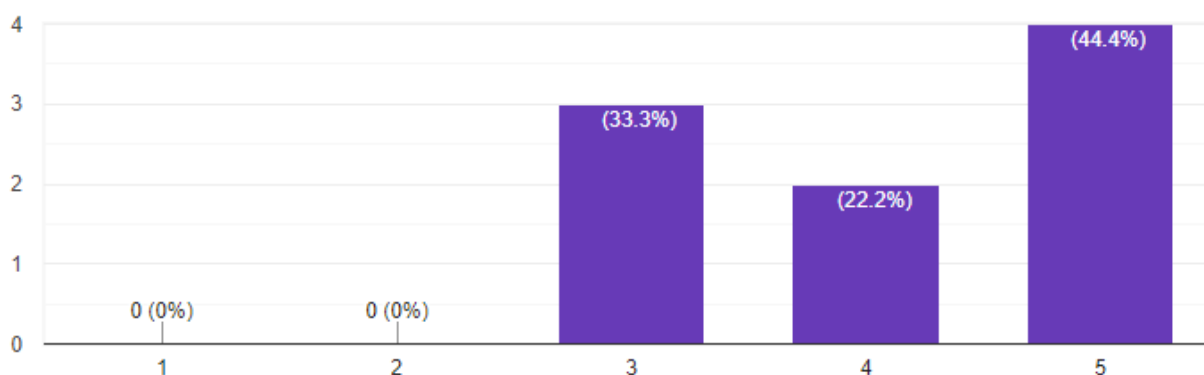
ส่วนที่ 2 ความคิดเห็นเกี่ยวกับการดำเนินโครงการ

1. การบรรลุเป้าหมายของโครงการ

1.1 หลังจากเข้าร่วมโครงการ ท่านมีความรู้เกี่ยวกับไบโอพลาสติกมากขึ้น

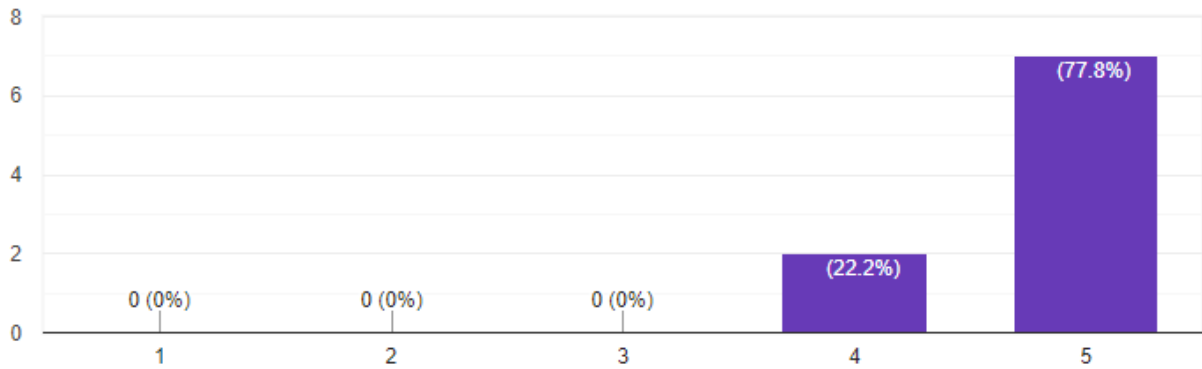


1.2 ท่านจะนำความรู้และประสบการณ์จากเข้าร่วมโครงการไปใช้ประโยชน์ได้จริง

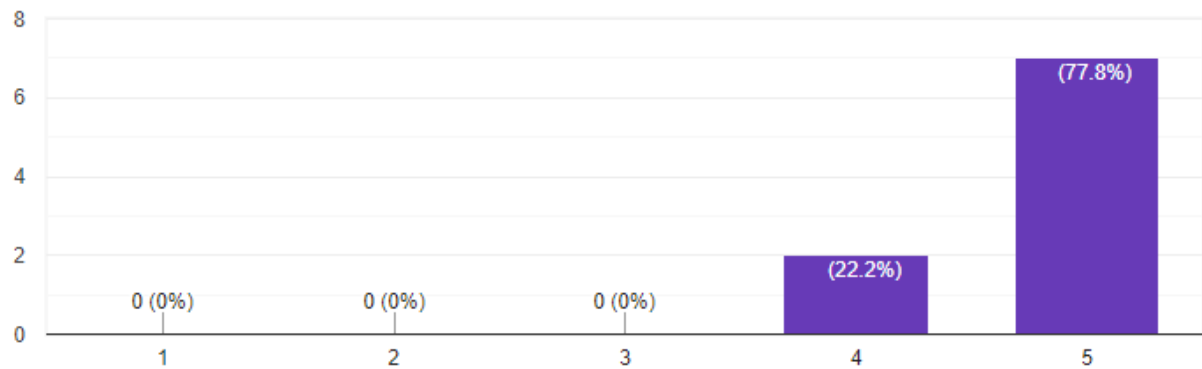


2. วิทยากร

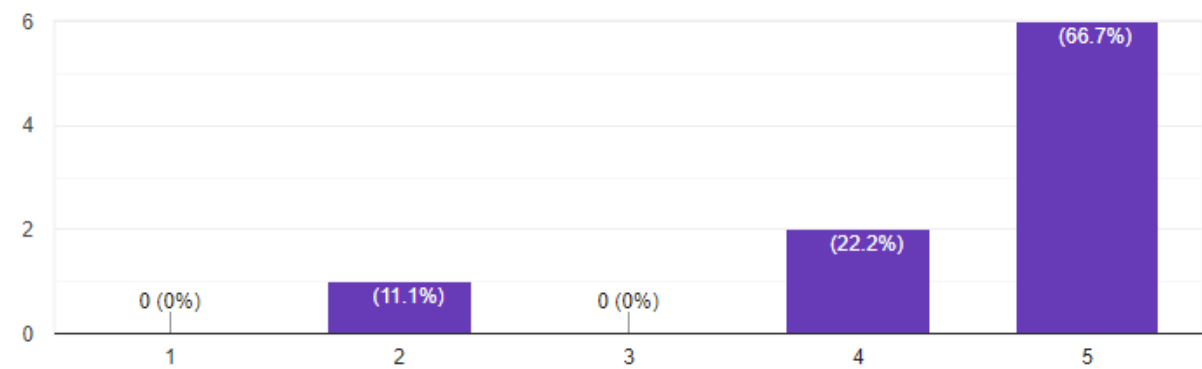
2.1 มีความรู้และความเข้าใจเกี่ยวกับหัวข้อที่บรรยาย



2.2 อธิบายประเด็นต่างๆ และการตอบข้อซักถามได้อย่างชัดเจน

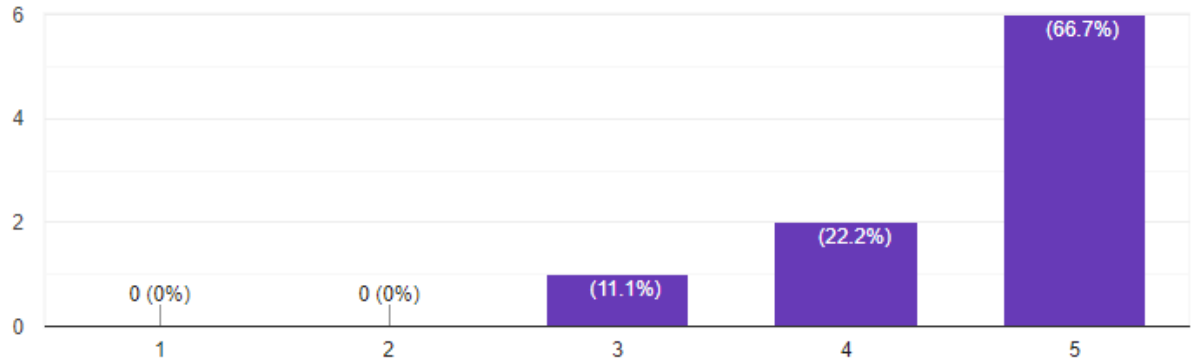


2.3 ส่งเสริมการนำไปปฏิบัติได้จริง

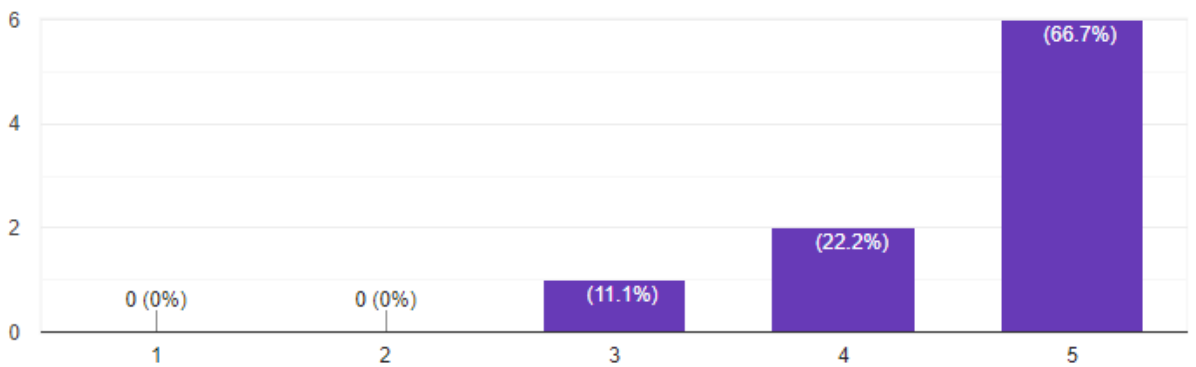


3. ความคิดเห็นเกี่ยวกับการดำเนินโครงการ

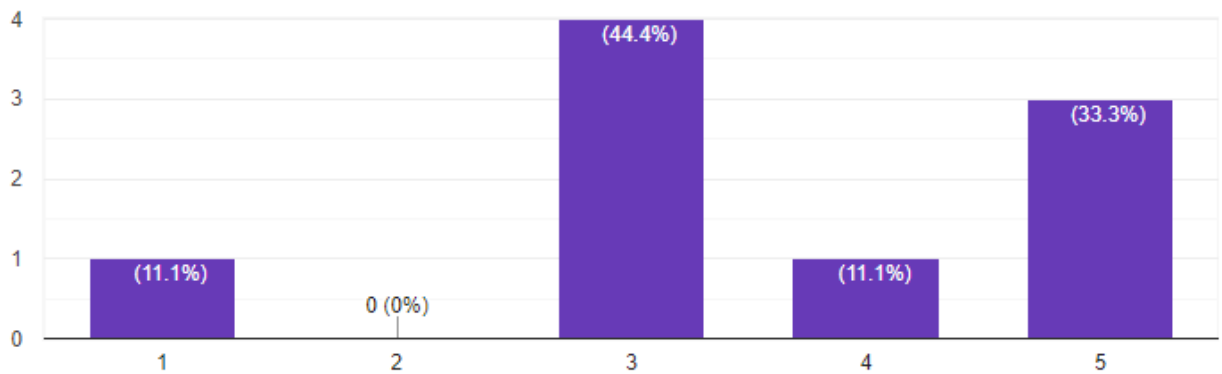
3.1 สถานที่ในการจัดโครงการมีความเหมาะสม



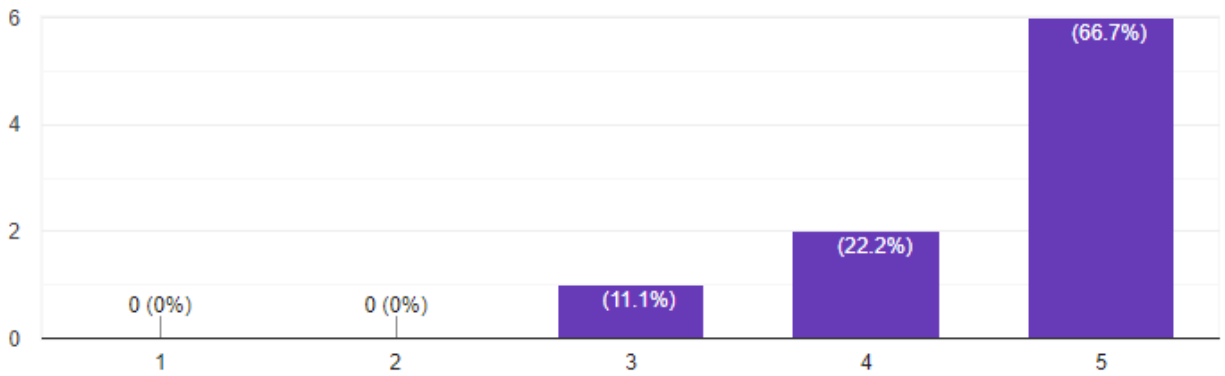
3.2 วันและเวลาในการจัดโครงการมีความเหมาะสม



3.3 การประชาสัมพันธ์โครงการ

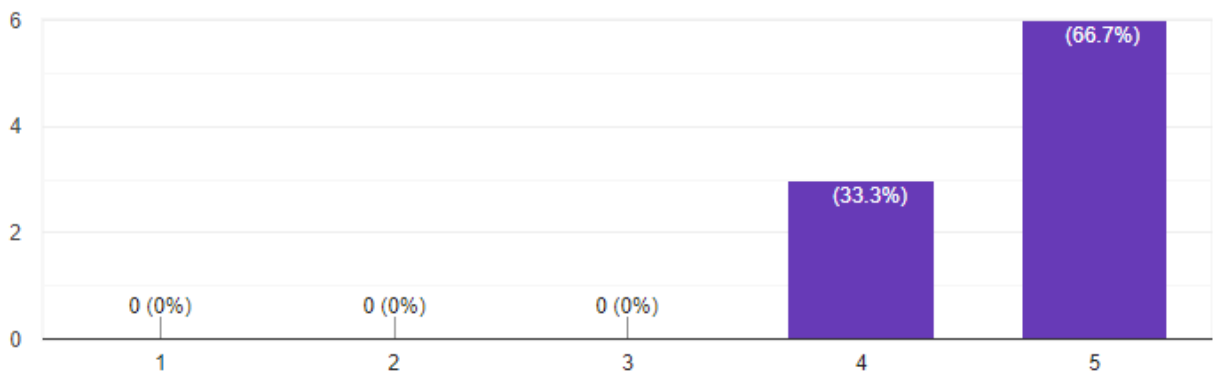


3.4 อาหารกลางวัน และอาหารว่าง มีความเหมาะสม



4. ภาพรวมในการจัดโครงการ

4.1 ความพึงพอใจโดยรวมในการจัดโครงการ



4.2 ข้อเสนอแนะอื่นๆ

- อยากให้จัดการอบรมแบบนี้อีกเป็นประจํา จจริงมีคนสนใจเยอะแต่ติดงาน ควรมีสองเดือนครั้ง
- อยากให้การจัดเยี่ยมชมโรงงานของภาคเอกชนด้วยครับ

บทที่ 5

สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างองค์ความรู้และพัฒนาการผลิตพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบ เพื่อใช้ประโยชน์ในเชิงสาธารณสุข ในรูปของบรรจุภัณฑ์ ด้วยเทคนิคการขึ้นรูปแบบเป่าฟิล์ม และถ่ายทอดองค์ความรู้แก่ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับการผลิตผลิตภัณฑ์พลาสติก และนิสิต นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป ผ่านการอบรม/สัมมนา ผลจากการวิจัยสามารถสรุปได้ดังนี้

1. การผลิตพลาสติกชีวภาพที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบสามารถทำได้โดยใช้พลาสติกชนิดอื่น เช่น PBAT หรือ LLDPE เป็นวัสดุหลัก และมีองค์ประกอบของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไม่เกินร้อยละ 30 โดยใช้เครื่องผสมอัดรีดแบบเกลียวหนอนคู่ในการคอมพาวด์เป็นเม็ดพลาสติก อุณหภูมิที่ใช้ในการคอมพาวด์เม็ดพลาสติกฐานชีวภาพมีค่าไม่เกิน 170 °C และใช้เทคนิคการขึ้นรูปฟิล์มแบบเป่าขึ้นรูป มีอุณหภูมิที่ใช้ในการเป่าฟิล์มไม่เกิน 180 °C

2. ความสามารถในการเป่าขึ้นรูปของเม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส เทอร์โมพลาสติกสตาเรซ กับ Ecoflex® และ LLDPE เรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ดังนี้

LLDPE-CMC 1-1 TPS ~ LLDPE-CMC 1-1 > PBAT-CMC,Starch-Plas >

LLDPE-CMC,Starch-Plas ~ LLDPE-CMC,Starch-Plas > PBAT-CMC-Plas

3. เม็ดคอมพาวด์พลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาเรซกับ LLDPE โดยมีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ทุกสูตร และมีค่า Blow up ratio ใกล้เคียงกัน และอยู่ในช่วง 3.0–3.2 นอกจากนี้ความหนาของฟิล์มทุกสูตรยังมีค่าใกล้เคียงกัน และค่อนข้างสม่ำเสมอ อยู่ในช่วง 20–27 ไมครอน ซึ่งใกล้เคียงกับฟิล์มพอลิเอทิลีนชนิดความหนาแน่นต่ำที่ใช้ทำถุงหิ้ว

4. ฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีความหนาอยู่ระหว่าง 0.020–0.280 มม. ขึ้นกับองค์ประกอบ และการเกิดเจลของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสในระหว่างการคอมพาวด์

5. ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ LLDPE แสดงค่ามอดูลัสของยังสูงกว่า (20 MPa และ 7.9 MPa) ฟิล์มที่มีส่วนประกอบหลักของพอลิเมอร์ Ecoflex® แต่ให้ค่าระยะยืดต่ำกว่า (29% และ 63%)

6. ฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณมากมีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยังสูงกว่าฟิล์มที่เติมกลีเซอรอลปริมาณน้อย

7. फिल्मที่มีอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำน้อย มีค่าร้อยละการยืด ณ จุดขาด ความแข็งแรงดึง และมอดูลัสของยัง สูงกว่าฟิล์มที่มีอัตราส่วนระหว่างการผสมคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสกับน้ำมาก

8. फिल्मที่ขึ้นรูปจากเม็ดพลาสติกฐานชีวภาพเทอร์โมพลาสติกสตาร์ชกับ LLDPE ที่มีคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเป็นองค์ประกอบในปริมาณต่ำ มีความสามารถในการรับแรงกระแทก ค่ามอดูลัสของยัง ความแข็งแรงดึง และร้อยละการยืด ณ จุดขาด ของฟิล์มลดลงเมื่อฟิล์มมีปริมาณคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

9. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหิ้วที่ผลิตจากฟิล์มที่มีองค์ประกอบที่แตกต่างกัน มีความหนา ผิวสัมผัส และสีที่แตกต่างกัน แต่สามารถนำมาใช้งานจริงได้

10. ผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหิ้วที่ได้รับการประเมินว่าผู้ประเมินมีความพึงพอใจมากที่สุดคือ ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC1%-TPS และ ถุงหิ้วจากฟิล์ม LLDPE-CMC2%-TPS เนื่องจากมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียน มีความแข็งแรงและยืดหยุ่น รวมถึงมีส่วนประกอบที่สามารถย่อยสลายได้มากถึงร้อยละ 30

11. ผู้เข้าร่วมโครงการถ่ายทอดองค์ความรู้ เรื่อง ไบโอบลาสติก...จากต้นน้ำสู่ปลายน้ำ มากกว่าร้อยละ 85 มีความรู้เกี่ยวกับไบโอบลาสติกมากขึ้น ผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ 65 จะนำความรู้และประสบการณ์จากเข้าร่วมโครงการไปใช้ประโยชน์ได้จริง และผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ 85 คิดว่าการอบรมส่งเสริมการนำไปปฏิบัติได้จริงได้

เอกสารอ้างอิง

- [1] หนังสือพิมพ์ไทยโพสต์, “ไบโอพลาสติก อนาคตเศรษฐกิจสีเขียวโลกสู่ความร่วมมือเพื่อสร้างโอกาสพัฒนาผลิตภัณฑ์พลาสติก” ฉบับวันที่ 8 มิถุนายน 2559.
- [2] Sujaipun Khemkaew and Supranee Kaewpirom, (2016). “Effects of Glycerol and PEG-10 dimethicone on Properties of Biofilm from Durian rind”, *Journal of Industrial Technology*, 12, 11-21.
- [3] สุปราณี แก้วภิรมย์. การสังเคราะห์ฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน: ผลของสารเติมแต่งบางชนิดต่อสมบัติทางกายภาพและสมบัติเชิงกล. รายงานฉบับสมบูรณ์ ทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากมหาวิทยาลัยบูรพา ประเภทงบประมาณเงินรายได้ จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) 2559 (เพิ่มเติม) มหาวิทยาลัยบูรพา.
- [4] Arruda, L.C., Magaton, M., Bretas, R.E.S., Ueki, M.M. (2015), “Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends”, *Polymer Testing* 43, 27-37.
- [5] IRPC Public Company Limited, Brown film extrusion, เข้าถึงจาก www.irpcmarket.com/upload/infobox/65bf41754bce1176260cec14830ae209-doc.pdf (เข้าถึงเมื่อ 4 ตุลาคม 2560).
- [6] Hu, D., Wang, H., and Wang, L. (2016). “Physical properties and antibacterial activity of quaternized chitosan/carboxymethyl cellulose blend films”, *LWT - Food Science and Technology* 65, 398-405.
- [7] Dang, K.M., Yoksan, R., (2015) “Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan”, *Carbohydrate Polymers* 115, 575–581.
- [8] พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิตยา รัตนาปนนท์ (2555), เซลลูโลส วันที่สืบค้นข้อมูล 16 มกราคม 2561. เข้าถึงได้จาก www.foodnetworksolution.com/wiki/work/0612/cellulose-เซลลูโลส
- [9] ปิยพร ร่มแสง, มัตติกา ไชยลังกา, รังสรรค์ กุณสะนา, วิชชากร กันทรัญญ, อนุวัฒน์ โรจน์สินทรัพย์, และนพพล เล็กสวัสดิ์ (2555). CMC biopolymer. สาขาวิศวกรรมกระบวนการอาหาร, สำนักวิชาการอุตสาหกรรมเกษตร. คณะอุตสาหกรรมเกษตร. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- [10] เกวริน รัตนจรัสกุล. (2555). การพัฒนาฟิล์มต้านจุลินทรีย์จากคาร์บอกซีเมธิลเซลลูโลสร่วมกับ น้ำมันสะระแหน่ *Mentha piperita*. วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต. สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ. คณะวิทยาศาสตร์. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [11] วิกิพีเดีย สารานุกรมเสรี. (2563). แป้ง (สารอาหาร). วันที่สืบค้นข้อมูล 3 มกราคม 2563. เข้าถึงได้จาก [https://th.wikipedia.org/wiki/แป้ง_\(สารอาหาร\)](https://th.wikipedia.org/wiki/แป้ง_(สารอาหาร))
- [12] Janaswamy, S. (2014). "Encapsulation altered starch digestion: Toward developing starch-based delivery systems", *Carbohydrate Polymers* 101, 600–605.
- [13] Buléon, A., Colona, P., Planchot, V., Ball, S.G. (1998). "Starch granules: structure and biosynthesis", *International Journal of Biological Macromolecules* 23(2), 85–112.
- [14] ดุษฎี อุดภาพ และน้องนุช เจริญกุล. (2562) เทคโนโลยีของคาร์โบไฮเดรต *Carbohydrate Technology*. เอกสารคำสอน. สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี. คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี. วันที่สืบค้นข้อมูล 6 พฤศจิกายน 2562, เข้าถึงได้จาก https://eu.lib.kmutt.ac.th/elearning/Courseware/BCT611/Chap2/chapter2_4.html
- [15] วันชัย เลิศวิจิตรจรัส, อำนาจ สิทธิธรรมกุล และเจกิตาน์ แก้วพารา (2551). "ศักยภาพการผลิตเทอร์โมพลาสติกที่เตรียมจากแป้ง". *ส่งเสริมเทคโนโลยี* 35(200), 56–64.
- [16] <https://www.ptonline.com/articles/density-molecular-weight-in-polyethylene> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [17] https://en.wikipedia.org/wiki/Linear_low-density_polyethylene วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [18] Stagner, J. (2015). "Methane generation from anaerobic digestion of biodegradable plastics – a review". *International Journal of Environmental Studies*. 73(3), 462–468.
- [19] Gómez-Gómez; J.F., González-Madariaga, F.J., Rosa-Sierra, L. A., León-Morán, R. M., Tobias, A. (2016). "Scrap denim-PP composites as a material for new product design". *FDP'16 - Systems & Design: Beyond Processes and Thinking*. Universitat Politècnica de València, Spain. doi:10.4995/IFDP.2016.3360. ISBN 9788490484401.

- [20] <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=31154046> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [21] อรุษา สรวารี. (2546). สารเติมแต่งพอลิเมอร์ เล่ม 1. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- [22] สุปราณี แก้วภิรมย์. (2557). การเสื่อมสภาพและความเสถียรของพอลิเมอร์. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา. สำเนาเย็บเล่ม 210 หน้า.
- [23] สมศักดิ์ วรมงคลชัย. (2547). สารปรับแต่งพอลิเมอร์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: บุ๊คเน็ต.
- [24] Kulshreshtha AK., and Awasthi SK., Chapter 4: Polymers Processing Additives (2000), pp. 105-162, in Handbook of Polymer Degradation, 2nd ed., Series editor: S.H. Hamid, Marcel Dekker, Inc., USA.
- [25] Bolgar M., Hubball J., Groeger J., and Meronck S., Handbook for the chemical analysis of plastic and polymer additives (2008), 1st ed., CRC Press.
- [26] Sofla, M.S.K., Mortazavi, S., Seyf, J. (2020). Preparation and characterization of polyvinyl alcohol/chitosan blends plasticized and compatibilized by glycerol/polyethylene glycol. Carbohydrate Polymers, 232, 115784.
- [27] Babak Ghanbarzadeha, B., Almasia, H., E, A. A. (2011). Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible film: Effect of citric acid and CMC. Industrial crops and products 33, 229-235.
- [28] Campbell, D. and White, J.R. (1989). Polymer Characterization Physical Techniques, Chapman&Hall, London.
- [29] รังสิมา ชลคุป, วีรศักดิ์ สมितिพงศ์ และ กล้านรงค์ ศรีรอต. (2552). การทดสอบแรงดึง. วัสดุธรรมชาติรักษ์โลก (153-156). กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ห้างหุ้นส่วนจำกัด
- [30] จตุพร วุฒิกนกกาญจน์. เอกสารประกอบการสอน วิชา MTT656 Polymer Characterization and Analysis. คณะพลังงาน สิ่งแวดล้อมและวัสดุ. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าฯ ธนบุรี.
- [31] <https://plastics.ulprospector.com/properties/ASTMD1709> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563

- [32] <http://en.labthink.com/en-us/product/fdi-01-falling-dart-impact-tester.html> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [33] <https://www.slideshare.net/Instron/fundamentals-of-meltflowtesting> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [34] <https://www.lonroytester.com/plastic-testing-equipment/melt-flow-index-tester/iso1133-astm1238-melt-flow-index-test-machine.html> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [35] <https://suthaimachine.com/2016/10/25/single-screw-extrusion/> วันที่สืบค้นข้อมูล 23 มกราคม 2563
- [36] El-Tlhawy, B.M. (2011). Wear Resistant Extruder Screw: Regeneration of Screws, Research Proposal, Faculty of Engineering, Mansoura University.
- [37] กัญจนา ตระกูลคู. (2533). เทคโนโลยีพอลิเมอร์. ห้างหุ้นส่วนจำกัด เอ็กซ์เพรส มีเดีย. กรุงเทพฯ
- [38] Arruda, L.C., Magaton, M., Bretas, R.E.S., Ueki, M.M. (2015), "Influence of chain extender on mechanical, thermal and morphological properties of blown films of PLA/PBAT blends", *Polymer Testing* 43, 27-37.
- [39] IRPC Public Company Limited, Brown film extrusion, เข้าถึงจาก www.irpcmarket.com/upload/infobox/65bf41754bce1176260cec14830ae209-doc.pdf (เข้าถึงเมื่อ 4 ตุลาคม 2560).
- [40] Hu, D., Wang, H., and Wang, L. (2016). "Physical properties and antibacterial activity of quaternized chitosan/carboxymethyl cellulose blend films", *LWT - Food Science and Technology* 65, 398-405.
- [41] Li, J., Fang, L., Tait, W.R., Sun, L., Zhao, L., Qian, L. (2017). "Preparation of conductive composite hydrogels from carboxymethyl cellulose and polyaniline with a nontoxic crosslinking agent", *RSC Advance*, 7, 54823–54828.
- [42] Yang, X. H., Zhu, W. L. (2007). Viscosity properties of sodium carboxymethylcellulose solution. *Cellulose* 14, 409-417.

[43] Tavaresa, K. M., C, A., Mitsuyukib, M. C., Luchestic, B. R., Marconcinib, J. M. (2019). Corn and starch with CMC film and its mechanical and hydrophobic properties. *Carbohydrate Polymers* 223.

[44] Babak Ghanbarzadeha, B., Almasia, H., E, A. A. (2011). Improving the barrier and mechanical properties of corn starch-based edible film: Effect of citric acid and CMC. *Industrial crops and products* 33, 229-235.

[45] Dang, K.M., Yoksan, R., (2015) “Development of thermoplastic starch blown film by incorporating plasticized chitosan”, *Carbohydrate Polymers* 115, 575–581.

[46] Garcia, P.S., Grossmann, M.V.E., Shirai, M.A., Lazaretti, M.M., Yamashita, F., Muller, C.M.O., Mali, S. (2014). “Improving action of citric acid as compatibiliser in starch/polyester blown films”, *Industrial Crops and Products* 52, 305–312.

[47] Khanonkon, N., Yoksan, R., Ogale, A.A (2016). “Morphological characteristics of stearic acid-grafted starchcompatibilized linear low density polyethylene/thermoplastic starch blown film”, *European Polymer Journal* 76, 266–277.

[48] Khanonkon, N., Yoksan, R., Ogale, A.A (2016). “Effect of stearic acid-grafted starch compatibilizer on properties of linear low density polyethylene/thermoplastic starch blown film”, *Carbohydrate Polymers* 137, 165–173.

[49] ญัฎฐ์ธวดี จินาพันธ์, เจิมขวัญ สังข์สุวรรณ, สุทธิรา สุทสุฎา และสุฎุพัค ค่ำไทย (2555). คุณสมบัติของฟิล์มคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากเยื่อฟางข้าว. *วารสารวิทยาศาสตร์ทางเกษตร*. 43(3). 616-620.

[50] Overview of materials for linear low density polyethylene (LLDPE), blow molding grade วันที่สืบค้นข้อมูล 16 มกราคม 2561. เข้าถึงได้จาก <http://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=0f2c2d9eb5e442e4b538e3acf2d217ba&n=1&ckck=1>

[51] Ajith Kumar, K. A., Sreekala, M. S., Arun, S. (2012). “Studies on properties of bio-composites from ecoflex/ramie fabric-mechanical and barrier properties”, *Journal of Biomaterials and Nanobiotechnology* 3, 396-404.

[52] Grag, S.; Jana, A. K. (2007). “Studies on the properties and characteristics of starch–LDPE blend films using cross-linked, glycerol modified, cross-linked and glycerol modified starch”, *European Polymer Journal*, 43(9), 3976–3987.

[53] Morris, V.J. (1990). “Starch gelation and retrogradation”, *Trends in Food Science & Technology*, 1, 2–6.

[54] Nguyena, D.M.; Vua, T.T.; Grillet, A.C.; Ha Thuc, H.; Ha Thuc, C.N. (2016). “Effect of organoclay on morphology and properties of linear low density polyethylene and Vietnamese cassava starch biobased blend” *Carbohydrate Polymers*, 136, 163–170.

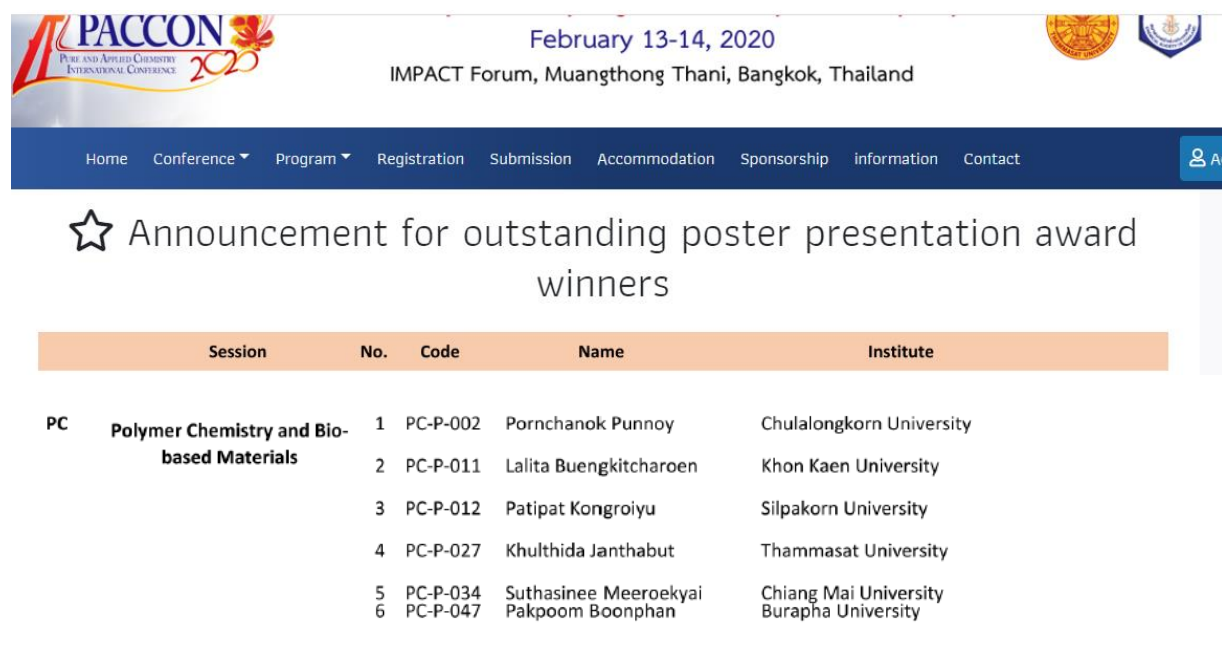
ผลผลิต (Output)

ผลงานเชิงประจักษ์

1. ในรูปของผลิตภัณฑ์ต้นแบบระดับห้องปฏิบัติการ (Lab prototype)
2. ในรูปของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ในรายงานเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับนานาชาติ ดังนี้

Pakpoom Boonphan, Anchasa Kamjaikittikul and Supraanee Kaewpirom (2020). Effect of Carboxymethyl Cellulose on Physical and Mechanical Properties of LLDPE/TPS Film. Pure and Applied Chemistry International Conference (PACCON 2020), 13–14 February 2020, IMPACT Forum, Muangthong Thani, Bangkok, Thailand.

ได้รับรางวัล Outstanding poster presentation award winners



The screenshot shows the website for the PACCON 2020 conference, held from February 13-14, 2020, at the IMPACT Forum in Muangthong Thani, Bangkok, Thailand. The website features a navigation menu with links for Home, Conference, Program, Registration, Submission, Accommodation, Sponsorship, information, and Contact. The main announcement is titled "Announcement for outstanding poster presentation award winners" and lists the winners for the "Polymer Chemistry and Bio-based Materials" session. The winners are listed in a table with columns for Session, No., Code, Name, and Institute.

Session	No.	Code	Name	Institute
PC Polymer Chemistry and Bio-based Materials	1	PC-P-002	Pornchanok Punnoy	Chulalongkorn University
	2	PC-P-011	Lalita Buengkitcharoen	Khon Kaen University
	3	PC-P-012	Patipat Kongroiya	Silpakorn University
	4	PC-P-027	Khulthida Janthabut	Thammasat University
	5	PC-P-034	Suthasinee Meeroekyai	Chiang Mai University
	6	PC-P-047	Pakpoom Boonphan	Burapha University

3. ในรูปของการจัดแสดงนิทรรศการผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหูหิ้ว

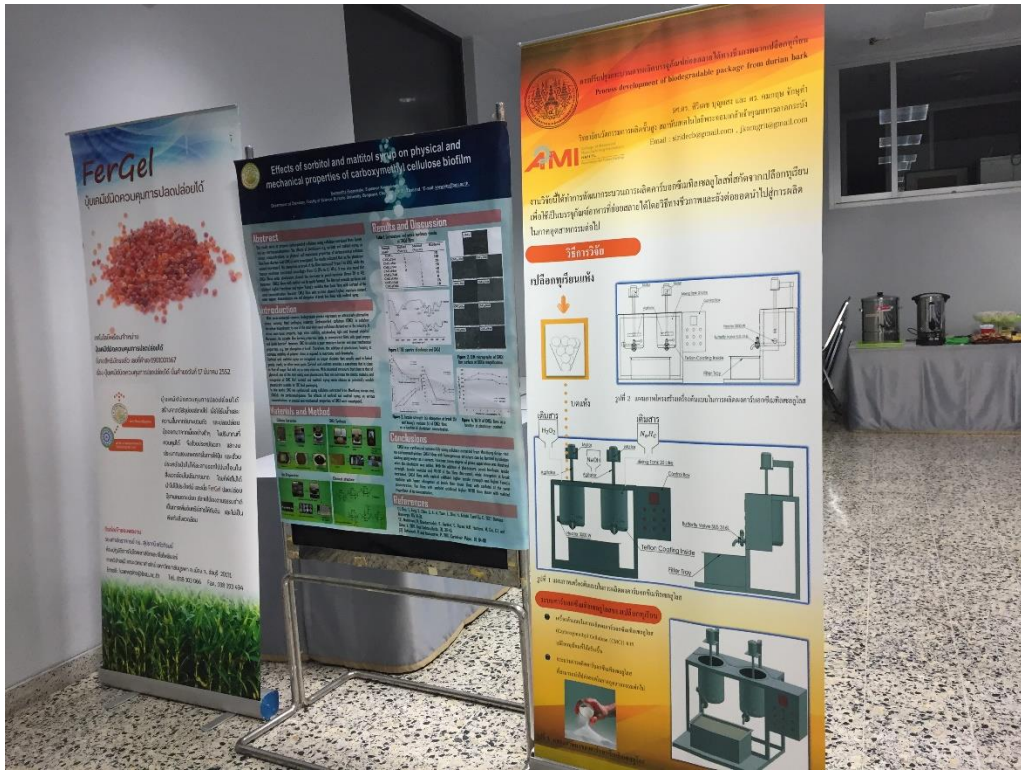
ภาคผนวก

1. ภาพบรรยากาศในงานอบรม/สัมมนา โปโพลสติก...จากต้นน้ำสู่ปลายน้ำ วันศุกร์ ที่ ๑๙ กรกฎาคม ๒๕๖๒ เวลา ๘.๓๐ ถึง ๑๖.๓๐ น. ณ ห้อง CL-203 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ. ชลบุรี
2. ภาพบรรยากาศในงานประชุมวิชาการ Applied Chemistry International Conference (PACCON 2020), February 13th – 14th, 2020, IMPACT forum, Muangthong Thani, Bangkok, Thailand.
3. ภาพบรรยากาศการจัดแสดงนิทรรศการผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหูหิ้ว
 - 3.1 The 7th 2019 Burapha University International Conference on Interdisciplinary Research, 27th-29th November 2019 @ Bangsaen Heritage Hotel , Chonburi, Thailand.
 - 3.2 งาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๖๓ ระหว่างวันที่ ๒ – ๖ กุมภาพันธ์ พ.ศ.๒๕๖๓ ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ

ภาคผนวก

1. ภาพบรรยากาศในงานอบรม/สัมมนา ไบโอฟลาสติก...จากต้นน้ำสู่ปลายน้ำ วันศุกร์ ที่ ๑๙ กรกฎาคม ๒๕๖๒ เวลา ๘.๓๐ ถึง ๑๖.๓๐ น. ณ ห้อง CL-203 อาคารปฏิบัติการพื้นฐานและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ. ชลบุรี











การขึ้นรูปฟิล์มต้นแบบที่มีส่วนผสมของคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลสในระดับอุตสาหกรรม

รองศาสตราจารย์ ดร. สุภรณี นวกวีภรณ์
 อธิการบดี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี 8, ถนนวิภาวดีรังสิต 203 E-Mail: kasrip@kmutt.ac.th

ความสำคัญและความจำเป็น

ปัญหาของฟิล์มและบรรจุภัณฑ์ชีวภาพในปัจจุบันคือการขาดคุณสมบัติความแข็งแรงทนทาน และคุณสมบัติการย่อยสลายที่รวดเร็วในธรรมชาติของฟิล์มชีวภาพ ซึ่งส่งผลต่อการใช้งาน การขาดคุณสมบัติการทนทานของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นโดยใช้วัตถุดิบจากพืชธรรมชาติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแง่ของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลส (CMC) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ และคุณสมบัติการย่อยสลายที่ช้าเกินไป การขาดคุณสมบัติการทนทานของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลส (CMC) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ และคุณสมบัติการย่อยสลายที่ช้าเกินไป การขาดคุณสมบัติการทนทานของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลส (CMC) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ และคุณสมบัติการย่อยสลายที่ช้าเกินไป

เม็ทพลาสติกคอมพาวด์

การเข้ารูป

ตัวอย่างฟิล์ม

เอกสารอ้างอิง

- 1) องค์การอาหารและยา (FDA) ประกาศ อนุญาตการใช้ฟิล์มชีวภาพชนิดนี้สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหารได้เมื่อวันที่ 8 สิงหาคม 2558
- 2) Sriporn, S. and S. Srisakul, 2014. "Preparation and Properties of Biodegradable Films from PBAT/Starch/CMC Composite of Biodegradable Polymers." Journal of Biotechnology, 12, 10-15.
- 3) สุภรณี นวกวีภรณ์, 2558. การผลิตฟิล์มชีวภาพจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลสผสมกับพอลิเอทิลีนแอดิพเทอโรเตอโรเตอไรต์ (PBAT) เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ชีวภาพ. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากโครงการวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 และได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) กระทรวงการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (The WCR) was financially supported by the Research Group of Bioprocess Technology through National Research Council of Thailand (Grant no. 2562-001-001-001).

การวิจัยและพัฒนากระบวนการผลิตฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียน
 Process development of biodegradable package from durian bark

ดร. พิชัย บุญสุข และ ดร. สุธาสินี นวกวีภรณ์
 วิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 อีเมล: sriddh@kmutt.ac.th, jantana@kmutt.ac.th

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนากระบวนการผลิตฟิล์มชีวภาพจากเปลือกทุเรียนเพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้โดยวิธีการพ่นเคลือบด้วยฟิล์มชีวภาพในภาคอุตสาหกรรมต่อไป

วิธีการวิจัย

ผลิตภัณฑ์

Figure 1: Schematic diagram of the biodegradable film production process from durian bark. The process starts with Durian Bark, which is processed into a pulp. This pulp is then mixed with water and other components to form a solution. The solution is then extruded through a spinneret into a water bath, where it forms a film. The film is then dried and collected on a roller.

Figure 2: Schematic diagram of the biodegradable film production process from durian bark. The process starts with Durian Bark, which is processed into a pulp. This pulp is then mixed with water and other components to form a solution. The solution is then extruded through a spinneret into a water bath, where it forms a film. The film is then dried and collected on a roller.

ข้อควรระวังในการใช้ฟิล์มชีวภาพ

- ฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลส (CMC) มีคุณสมบัติการย่อยสลายที่ช้าเกินไป
- การขาดคุณสมบัติการทนทานของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตขึ้นจากคาร์บอกซินเทิลเซลลูโลส (CMC) ซึ่งมีความแข็งแรงต่ำ และคุณสมบัติการย่อยสลายที่ช้าเกินไป













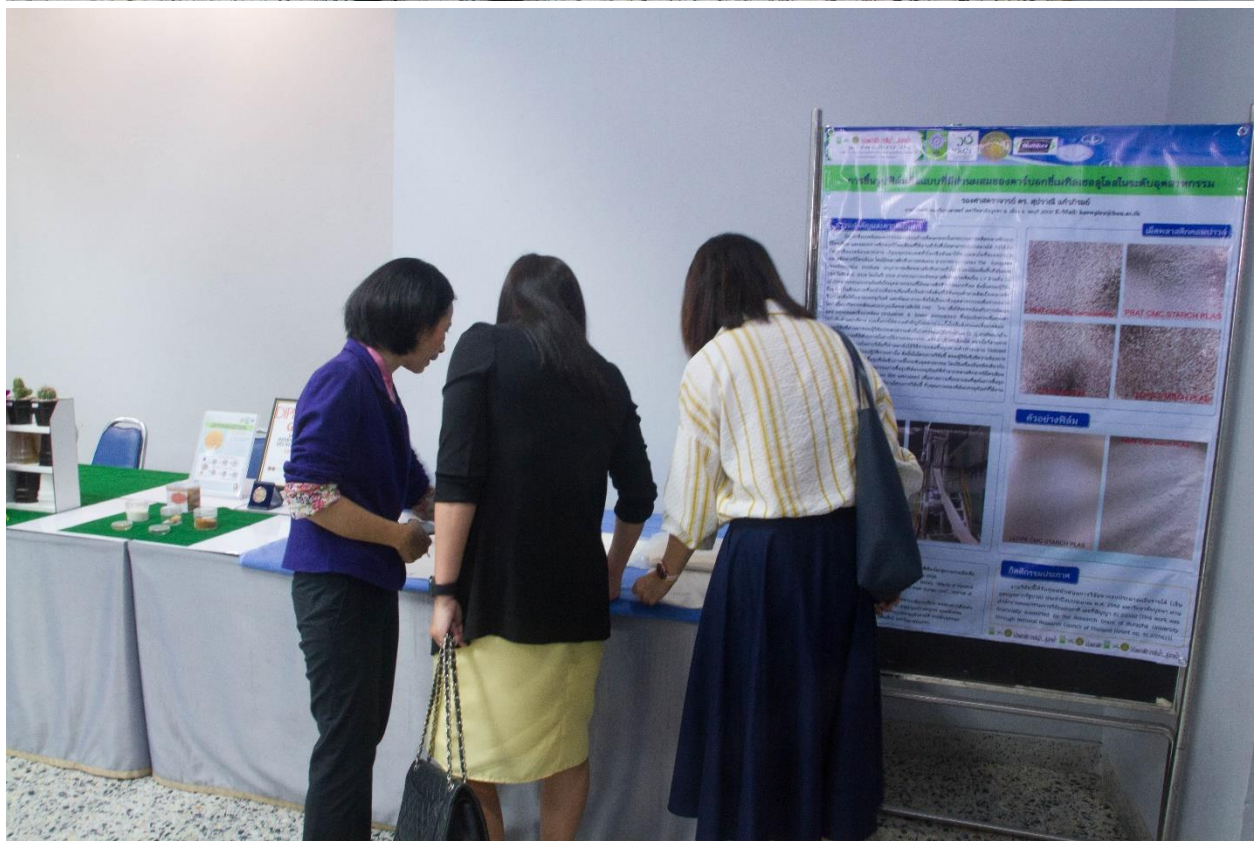


















โครงการอบรมเรื่อง ไบโอบลาสติก จากต้นน้ำ...สู่ปลายน้ำ

โครงการตามแผนปฏิบัติการชุดโครงการวิจัย การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้

โดยวิธีทางชีวภาพจากขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรในระดับอุตสาหกรรม

งบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล

ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒ มหาวิทยาลัยบูรพา

๑. ผู้รับผิดชอบ

รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์ และคณะวิจัย

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

โทรศัพท์ ๐-๓๘๑๐-๓๐๖๖ อีเมล kaewpiro@go.buu.ac.th

๒. หลักการและเหตุผล

ปัจจุบันทั่วโลกได้ตระหนักถึงผลเสียและอันตรายของการใช้พลาสติกจากปิโตรเลียม (Petroleum-based plastics) ทั้งในด้านสุขภาพและสิ่งแวดล้อม หลายประเทศประกาศเลิกใช้ หรือ ออกกฎหมายห้ามใช้พลาสติกบางประเภท และประเทศไทยก็ตระหนักถึงผลเสียนี้เช่นกัน โดยจากการประชุมคณะกรรมการบริหารจัดการขยะพลาสติก ครั้งที่ 3/2561 เมื่อวันที่ 26 ธันวาคม 2561 ที่ประชุมได้ประชุมพิจารณา (ร่าง) แผนปฏิบัติการด้านการจัดการขยะพลาสติก 20 ปี (พ.ศ. 2561-2580) พิจารณากำหนดการลดและเลิกใช้ผลิตภัณฑ์พลาสติกประเภทใช้ครั้งเดียวทิ้ง (Single-use Plastic) ที่พบมากในขยะทะเลของประเทศไทย และก่อให้เกิดผลกระทบต่อระบบนิเวศและสิ่งแวดล้อม โดยกำหนดให้เลิกใช้พลาสติก 3 ชนิด ในปี พ.ศ. 2562 ได้แก่ พลาสติกหุ้มฝาขวดน้ำดื่ม (Cap seal) ผลิตภัณฑ์พลาสติกที่มีส่วนผสมของสารประเภทออกโซ (Oxo) และ ไมโครบีดส์จากพลาสติก เลิกใช้พลาสติก 2 ชนิด ในปี พ.ศ. 2565 ได้แก่ ถุงพลาสติกหูหิ้วขนาดความหนาน้อยกว่า 36 ไมครอน และ กล่องโฟมบรรจุอาหาร และ เลิกใช้พลาสติก 2 ชนิด ในปี พ.ศ. 2568 ได้แก่ แก้วน้ำพลาสติกแบบใช้ครั้งเดียวทิ้ง และหลอดดูดพลาสติก

จากสถานการณ์ดังกล่าวทำให้พลาสติกชีวภาพได้รับความสนใจ และถูกนำมาใช้ทดแทนพลาสติกจากปิโตรเลียม ตลาดพลาสติกชีวภาพทั่วโลกขยายตัวอย่างรวดเร็ว และมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้นอย่างก้าวกระโดดหลังปี พ.ศ. 2560 (ที่มา: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/global-bio-plastics-market> (เข้าถึงเมื่อ 28 กันยายน 2560)) โดยในปี พ.ศ. 2558 ภาพรวมการผลิตพลาสติกชีวภาพคิดเป็น 1.7 ล้านตัน และอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์เป็นอุตสาหกรรมที่ใช้พลาสติกชีวภาพมากที่สุด แม้ว่าราคาของพลาสติกชีวภาพจะสูงกว่าพลาสติกจากปิโตรเลียมมากก็ตาม

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้มีการจัดอบรมเพื่อให้ความรู้เรื่อง “ไบโอพลาสติก จากต้นน้ำ...สู่ปลายน้ำ” ให้แก่ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติก และผู้สนใจทั่วไป เพื่อให้เกิดความเข้าใจและเล็งเห็นถึงศักยภาพของประเทศไทยในการผลิตพลาสติกชีวภาพอย่างครบวงจร ตั้งแต่ต้นน้ำไปจนถึงปลายน้ำ ตลอดจนการถ่ายทอดเทคโนโลยี นวัตกรรม และผลิตภัณฑ์ใหม่จากผลงานวิจัยที่เกิดจากชุดโครงการวิจัย การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพจากขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรในระดับอุตสาหกรรม ในวันศุกร์ที่ 19 กรกฎาคม 2562 อันจะเป็นแนวทางในการตอบโจทย์การพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพครบวงจรของประเทศไทย

๓. วัตถุประสงค์การจัดโครงการ

๓.๑ ถ่ายทอดองค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการผลิตไบโอพลาสติก เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพครบวงจรของประเทศไทย

๓.๒ เป็นช่องทางให้นักวิจัยของมหาวิทยาลัยบูรพาได้มีโอกาสแลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ ตลอดจนการสร้างเครือข่ายวิจัยกับภาคอุตสาหกรรม

๔. วิธีดำเนินการ

บรรยาย อภิปราย เยี่ยมชมโรงงานต้นแบบวิศวกรรมชีวเคมี

๕. เป้าหมายของโครงการ

ประมาณ ๓๐-๔๐ คน ประกอบด้วย ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติก อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไป

๖. งบประมาณดำเนินการ

งบประมาณ รวม ๓๗,๐๐๐ บาท (สามหมื่นเจ็ดพันบาทถ้วน) โดยเบิกจากเงินงบประมาณชุดโครงการวิจัย การพัฒนาบรรจุภัณฑ์อาหารที่ย่อยสลายได้โดยวิธีทางชีวภาพจากขยะเหลือทิ้งทางการเกษตรในระดับอุตสาหกรรม

ทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนจากรัฐบาล ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. ๒๕๖๒ มหาวิทยาลัยบูรพา ดังนี้

รายการ	เป็นเงิน (บาท)
๑. ค่าจ้างวิทยากร ชั่วโมงละ ๑,๒๐๐ บาท/ชม./คน	๘,๔๐๐.๐๐
๒. ค่าเดินทาง	๑,๐๐๐.๐๐
๓. ค่าอาหารกลางวัน	๑๖,๐๐๐.๐๐
๔. ค่าอาหารว่าง ๒ มื้อ	๖,๐๐๐.๐๐
๕. ค่าจ้างนิสิตช่วยงาน	๖๐๐.๐๐
๖. ค่าอุปกรณ์ตกแต่ง	๕,๐๐๐.๐๐

รวม ๓๗,๐๐๐ บาท

(สามหมื่นเจ็ดพันบาทถ้วน)

๗. วัน เวลา และสถานที่ในการดำเนินการ

วันศุกร์ ที่ ๑๙ กรกฎาคม ๒๕๖๒ เวลา ๘.๓๐ ถึง ๑๖.๓๐ น. ณ ห้อง CL-203

อาคารปฏิบัติการพื้นฐานและศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จ. ชลบุรี

๘. ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

๘.๑ ผู้ประกอบการที่เกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรมพลาสติก อาจารย์ นักวิจัย นักศึกษา และผู้สนใจทั่วไปได้รับองค์ความรู้ นวัตกรรม และเทคโนโลยีที่เกี่ยวกับการผลิตไบโอพลาสติก เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาอุตสาหกรรมพลาสติกชีวภาพครบวงจรของประเทศไทย

๘.๒ นักวิจัยของมหาวิทยาลัยบูรพาได้มีโอกาสถ่ายทอดผลงานวิจัย แลกเปลี่ยนความรู้และประสบการณ์ ตลอดจนการสร้างเครือข่ายวิจัยกับภาคอุตสาหกรรม

๙. ตัวชี้วัดความสำเร็จโครงการ (KPI)

ปริมาณ	คุณภาพ	เวลา	ต้นทุน
-	ผู้เข้าร่วมโครงการมากกว่าร้อยละ ๘๐ มีความพึงพอใจในกิจกรรมของโครงการ	จัดโครงการได้ภายในเวลาที่กำหนด	เป็นเงิน ๓๗,๐๐๐ บาท (สามหมื่นเจ็ดพันบาทถ้วน)

(รองศาสตราจารย์ ดร. สุปราณี แก้วภิรมย์)

อาจารย์ประจำภาควิชาเคมี

ผู้รับผิดชอบโครงการ

2. ภาพบรรยากาศในงานประชุมวิชาการ Applied Chemistry International Conference (PACCON 2020), February 13th – 14th, 2020, IMPACT forum, Muangthong Thani, Bangkok, Thailand.



**ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา**

ขอแสดงความยินดีกับ
นิสิตปริญญาตรี สาขาเคมี ชั้นปีที่ 4 (รหัส 59)



**“นายภาคภูมิ บุญปั้น”
ที่ได้รับรางวัล**

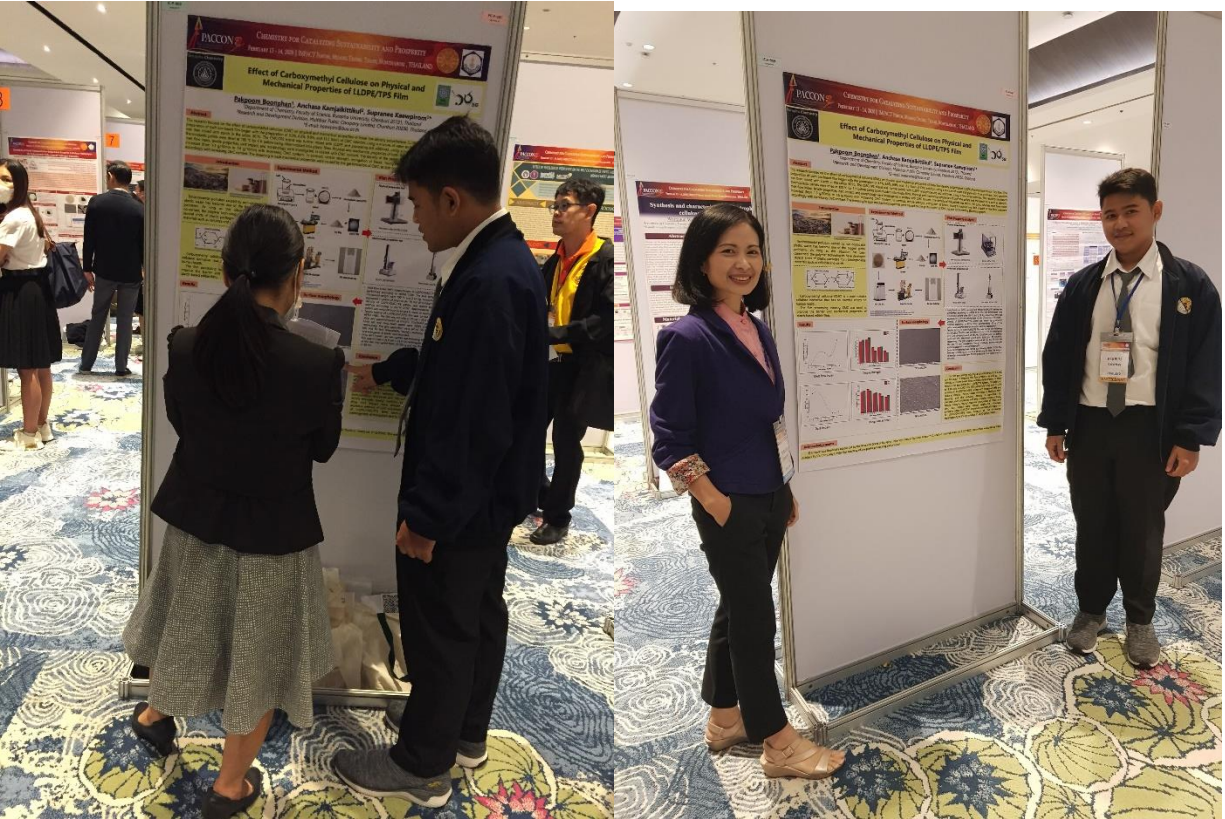
“การนำเสนอผลงานวิจัยแบบโปสเตอร์ที่โดดเด่น
สาขา Polymer Chemistry and Bio-based Materials”
ผลงานเรื่อง **Effect of Carboxymethyl Cellulose on
Physical and Mechanical Properties of LLDPE/TPS Film**



ในงานประชุมวิชาการระดับนานาชาติ **Pure and Applied Chemistry
International Conference 2020 (PACCON 2020)**
ระหว่างวันที่ 13-14 กุมภาพันธ์ 2563 ณ อาคารอิมแพ็คฟอรัม เมืองทองธานี



Department of
CHEMISTRY
Faculty of science, Burapha University





3. ภาพบรรยากาศการจัดแสดงนิทรรศการผลิตภัณฑ์ต้นแบบถุงหูหิ้ว

3.1 The 7th 2019 Burapha University International Conference on Interdisciplinary Research, 27th-29th November 2019 @ Bangsaen Heritage Hotel , Chonburi, Thailand.







3.2 งาน “วันนักประดิษฐ์” ประจำปี ๒๕๖๓ ระหว่างวันที่ ๒ – ๖ กุมภาพันธ์ พ.ศ.๒๕๖๓ ณ ศูนย์นิทรรศการและการประชุมไบเทค บางนา กรุงเทพฯ



